OFFRE D'ABONNEMENT 1 AN

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

2 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an		✓
Le hors-série papier 4 numéros par an	✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an		✓
Accès à pourlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996		✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**79 €** Au lieu de ~~114,40 €~~	**99 €** Au lieu de ~~174,40 €~~
	31 % de réduction *	**43 %** de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :
Pour la Science – Service abonnements – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr

PAG19STDDOS

☑ **OUI, je m'abonne pour 1 an à POUR LA SCIENCE**

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

☐ FORMULE **PAPIER + HORS SÉRIE** — **79€** Au lieu de ~~114,40€~~ — P1A79E
- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier

☐ FORMULE **INTÉGRALE** — **99€** Au lieu de ~~174,40€~~ — I1A99E
- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal ⌊⌊⌊⌊⌊ Ville : .....

Téléphone ⌊⌊⌊⌊⌊⌊⌊⌊⌊⌊

Email : (indispensable pour la formule intégrale)

..... @ .....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ **Par chèque** à l'ordre de Pour la Science

☐ **Carte bancaire**

N° ⌊⌊⌊⌊ ⌊⌊⌊⌊ ⌊⌊⌊⌊ ⌊⌊⌊⌊

Date d'expiration ⌊⌊ ⌊⌊ Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB) ⌊⌊⌊

Signature obligatoire :

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site https://boutique.pourlascience.fr. Photos non contractuelles.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société *Pour la Science*. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. *Pour la Science* ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à *Pour la Science*. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : https://rebrand.ly/charte-donnees-pls. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

Groupe Pour la Science - Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris CEDEX 14 - Sarl au capital de 32 000€ - RCS Paris B 311 797 393 - Siret : 311 797 393 000 23 - APE 58.14 Z

JEAN-PIERRE LUMINET

« Je continue à penser que la constante cosmologique fait partie intégrante de la relativité générale et explique correctement les choses »

Le 10 avril 2019 fut publiée la première image d'un trou noir, et elle était conforme à celle que vous aviez simulée quarante ans auparavant. Qu'avez-vous ressenti ?

Jean-Pierre Luminet : J'étais ému. Cependant, je m'y attendais, car depuis quelques mois, j'étais en contact avec Shep Doeleman, qui dirigeait l'*Event Horizon Telescope* (*EHT*), le réseau de télescopes à l'origine de cette image du trou noir supermassif situé au cœur de la galaxie M87. J'étais confiant, car je pensais bien avoir correctement écrit les équations de la relativité générale. Le seul petit suspense concernait l'angle de vue. En 1979, mes calculs avaient été faits avec les moyens de l'époque et, même si les équations fournissaient tous les angles possibles (polaire, équatorial…), je n'avais publié qu'un dessin, composé de seulement 10 000 points, correspondant à un seul de ces points de vue. Mais on voyait bien l'effet Doppler majeur par lequel une partie du disque est plus brillante que l'autre à cause de la rotation. C'est vraiment une caractéristique essentielle du trou noir.

Et on la voit bien dans l'image de l'*EHT* ! Quand elle a été publiée, je ne m'occupais plus de ces histoires depuis des années. J'ai donc fouillé et retrouvé d'anciens travaux, notamment ceux effectués au début des années 1990 avec un de mes collaborateurs, Jean-Alain Marck. Il avait fait de superbes simulations numériques, en couleurs, dont certaines ont d'ailleurs été publiées dans un hors-série de *Pour la science*, en… 1997. L'une d'elles et l'image réelle de l'*EHT* se correspondent comme deux gouttes d'eau !

Je n'ai donc pas été surpris, mais heureux. D'autant que, quand j'ai fait ces calculs en 1978, jamais je n'aurais imaginé voir de mon vivant une image réelle pour laquelle des moyens phénoménaux auraient été déployés – l'*EHT* étant un télescope virtuel de la taille de la Terre !

BIO EXPRESS

3 JUIN 1951
Naissance à Cavaillon.

1979
Première simulation d'un trou noir entouré d'un disque d'accrétion.

1982
Premières modélisations de la rupture explosive d'étoiles par les trous noirs géants.

1995
Publie des articles sur la topologie de l'Univers.

2003
Modèles d'Univers dodécaédrique.

2019
Chroniques de l'espace (Cherche-Midi et France Inter).

Pour la petite histoire, le 10 avril, j'étais en Ouzbékistan. Avec le faible wifi de l'hôtel, j'ai suivi la conférence de presse de l'*EHT*. C'était un peu frustrant de ne pas pouvoir répondre aux nombreuses sollicitations.

Les trous noirs sont aussi au centre d'une découverte majeure, la détection d'ondes gravitationnelles en septembre 2015. Qu'est-ce que cela vous inspire ?

Jean-Pierre Luminet : Là encore, c'était attendu, puisque parfaitement prévu par la théorie. D'autre part, de nombreux progrès instrumentaux et techniques laissaient penser qu'on y arriverait. Mais peut-être pas aussi vite… La détection a eu lieu dès que le niveau de sensibilité nécessaire a été atteint. Et, depuis, les événements s'accumulent. Déjà dix ont été confirmés, et l'on compte une trentaine de candidats en attente de validation.

Est-ce étonnant qu'il y en ait autant ?

Jean-Pierre Luminet : C'est en effet une surprise. Il y a beaucoup plus de fusions de trous noirs, et donc de trous noirs, qu'on ne le pensait. En outre, les estimations de masses données correspondent à des trous noirs plus massifs qu'on ne l'imaginait. Le plus souvent, la masse des trous noirs dits « électromagnétiques », ceux des sources X binaires détectés, ne dépasse pas 10 fois la masse du soleil. Là, elles sont de l'ordre de 30 masses solaires, et vont jusqu'à 60 ! On doit affiner nos modèles pour l'expliquer.

On pense alors à la matière noire…

Jean-Pierre Luminet : Les trous noirs sont de fait des candidats naturels pour l'expliquer. Mais il y en a toujours beaucoup trop peu pour rendre compte d'une partie significative de cette matière noire. Même les trous noirs primordiaux, nés peu après le Big Bang, sont insuffisants.

Avec ces ondes gravitationnelles, le plus intéressant est ailleurs : dans la détection de celles nées de la fusion de deux étoiles à neutrons, comme ce fut le cas le 17 août 2017, car on dispose également du signal électromagnétique qui accompagne le phénomène, notamment le sursaut gamma. On peut en suivre la décroissance grâce à tout un arsenal de télescopes dans les longueurs d'onde différentes (*voir À l'écoute des ondes gravitationnelles, par D. Buskulic, page 22*). Tous les modèles de coalescences peuvent alors être testés et contraints.

Il y a beaucoup plus de fusions de trous noirs, et donc de trous noirs, qu'on ne le pensait

On entend dire que ces ondes gravitationnelles sont une nouvelle fenêtre sur l'Univers. Qu'en pensez-vous ?

Jean-Pierre Luminet : C'est bien le cas. Avec les ondes gravitationnelles, on est débarrassé de toute autre forme d'interaction, car l'Univers y est totalement transparent. La totalité de l'Univers devient accessible, même la période datant d'avant le fond diffus cosmologique, c'est-à-dire les 380 000 premières années de l'histoire cosmique pour lesquelles on ne dispose d'aucun signal électromagnétique (l'Univers était opaque).

Reste néanmoins le problème de l'amplitude. Seules les ondes gravitationnelles émises par les systèmes binaires dont nous avons parlé sont détectables à ce jour par *Virgo* et *Ligo*. Pour espérer « entendre » par exemple les ondes gravitationnelles dites « primordiales », prédites par certains modèles, les appareils doivent gagner en sensibilité. C'est le sens de *Lisa*, un projet d'interférométrie spatiale de l'Agence spatiale européenne (ESA), une mission phare de l'astrophysique du XXIe siècle.

Les fréquences sont aussi un paramètre important. *Lisa* aura accès à des gammes correspondant cette fois à la fusion de deux trous noirs supermassifs, un événement consécutif à la fusion de galaxies.

Autre avantage de *Lisa*, l'anticipation. Avec les détecteurs au sol, on ne recueille le signal que des quarante dernières secondes de la fusion. Le futur dispositif (une constellation de trois satellites formant un triangle équilatéral de 2,5 millions de kilomètres de côté) détectera quasiment dix ans avant la fusion les trous noirs en orbite et émettant déjà des ondes gravitationnelles. Débarrassée de toutes les complications électromagnétiques, neutriniques… l'astronomie gravitationnelle sera tellement précise qu'elle pourrait prédire à l'heure près, plusieurs années à l'avance, le moment de la fusion !

Revenons à la matière noire, cette autre entité obscure de l'Univers. Pouvez-vous nous rappeler d'où vient cette idée ?

Jean-Pierre Luminet : Rappelons pour commencer que le modèle standard de la cosmologie est noté ΛCDM. Son écriture même met en avant deux problèmes ! Le Λ est associé à celui de l'énergie sombre, nous y reviendrons, tandis que CDM renvoie à la matière noire, car ces lettres signifient *cold dark matter*, soit « matière noire froide ». Ce modèle n'est pas forcément le bon, mais il est celui qui, pour l'instant et vraiment de loin, explique le maximum d'observations.

L'idée de matière noire est née des observations de Fritz Zwicky en 1933. Dans l'amas de Coma, il a constaté que les vitesses de dispersion des galaxies étaient bien trop élevées par rapport à ce que laissait supposer la matière visible. Il devait donc y avoir une « masse manquante », une matière noire. C'est un principe très général ! La détection de tout ce qui est noir a procédé de la même façon, par des détections indirectes. Ce fut aussi le cas pour Neptune, découverte à partir des perturbations d'Uranus.

Puis dans les années 1950, des astrophysiciens se sont intéressés aux courbes de rotation des galaxies spirales. En s'en tenant à la seule matière visible, les vitesses des étoiles au sein d'une galaxie devraient décroître à mesure qu'on s'éloigne du centre. Ce n'est pas le cas ! Les vitesses atteignent en fait un plateau. Pour l'expliquer, on a imaginé là aussi une « matière noire » qui dans un vaste halo sphérique autour de la galaxie et y change le potentiel gravitationnel.

Ces deux arguments expérimentaux, déjà assez forts, laissaient soupçonner qu'il y avait au moins de l'ordre de dix fois plus de matière noire que de matière visible. On pensait néanmoins à une matière noire ordinaire, dite « baryonique », semblable à celle qui constitue justement la matière lumineuse. >

Mais des arguments théoriques ont changé la donne ?

Jean-Pierre Luminet : Oui. Grâce à la nucléosynthèse primordiale, on sait désormais que la matière baryonique, plus précisément sa densité, atteint au maximum 5 % de la densité critique (l'ensemble des constituants de l'Univers), cette densité théorique qui ferait que l'Univers serait globalement euclidien (plat), comme le suggèrent les observations.

Un deuxième élément théorique absolument fondamental est venu avec l'idée d'inflation développée dans les années 1980. Selon ce modèle, d'une part l'Univers a enflé considérablement dans ses premiers instants, mais d'autre part, sa densité est très proche de la densité critique. Donc, pas de doute, énormément de choses manquent à l'appel.

Enfin, un troisième élément théorique est apparu avec l'élaboration des théories au-delà du modèle standard des particules. Par exemple, la supersymétrie (SUSY) postule l'existence de partenaires dits « supersymétriques » à toutes les particules déjà connues, des « sparticules », parmi lesquelles se trouvent des candidats pour la matière noire non baryonique. D'autres théories ont vu le jour, chacune venant avec ses particules de matière noire non baryonique, comme les axions (*voir L'axion, une idée qui a la cote, par L. Rosenberg, page 56*). Mais tous ces modèles restent extrêmement spéculatifs et tiennent de moins en moins bien la route.

En fin de compte, quelles sont les hypothèses ?

Jean-Pierre Luminet : On se retrouve avec trois types de matière noire : la chaude, la tiède et la froide, respectivement notées HDM, WDM et CDM. Ce n'est pas une question de température, mais plutôt de vitesse. Les particules de matière noire chaude seraient, comme les neutrinos, des particules animées de vitesses relativistes. La matière noire tiède serait constituée de particules intermédiaires plus lentes, comme les neutrinos stériles. Et la froide, qui a fini par devenir le modèle standard de la cosmologie, serait soit des axions, soit les neutralinos, des particules prédites par la supersymétrie.

En quoi consistent les neutrinos stériles ?

Jean-Pierre Luminet : Le modèle standard au sens strict prédit trois espèces de neutrinos dont on a découvert en 1998 les oscillations : ils passent d'un type à un autre. Pour ce faire, ils doivent avoir une masse. Cependant, elle est si faible qu'elle interdit aux neutrinos de rendre compte de la matière noire. C'était le sujet d'une de mes premières publications en cosmologie en 1981 peu après celle sur les trous noirs.

Mais les neutrinos ordinaires sont des particules étranges. Normalement, les particules peuvent avoir deux hélicités (une propriété liée au spin), soit droite soit gauche. Pourtant, on ne connaît aucun neutrino droit. L'une des explications possibles est, sur la base des travaux du physicien italien Ettore Majorana, d'imaginer une nouvelle particule, une quatrième espèce de neutrino, dit « stérile » parce que, contrairement aux autres (dits « actifs »), il n'interagirait que *via* la gravité. En principe, ces neutrinos stériles pourraient être suffisamment massifs pour rendre compte de tout ou partie de la matière noire.

Comment trancher ?

Jean-Pierre Luminet : Deux solutions. Examiner les prédictions astrophysiques liées à chacun des types de matière noire et comparer avec des observations, ou bien détecter les particules associées. Cette dernière option a été peu concluante, malgré tous les efforts déployés (*voir La grande quête inachevée par A. Riazuelo, page 50*). Si la détection a échoué, peut-on fabriquer artificiellement les particules à haute énergie ? Le LHC, et quelques autres accélérateurs, s'y sont essayés, mais en vain, même pour les neutralinos qui, normalement, dans les théories de supersymétrie les plus simples, seraient dans la gamme de masse et d'énergie accessibles. Mais la supersymétrie, comme beaucoup de théories, contient de nombreux paramètres libres que l'on peut adapter pour la repousser toujours plus loin. Ce que fait David Gross et quelques autres tenants de la supersymétrie, qui ne veulent pas abandonner l'idée, au départ, avouons-le, assez jolie.

Donc David Gross n'honorera jamais son pari ?

Jean-Pierre Luminet : Il y a peu de chances ! Rappelons l'histoire. En 1994, au cours d'un dîner bien arrosé, en Sicile, les physiciens Kenneth Lane et David Gross font un pari sur le LHC, encore au stade de plans. Prouvera-t-il la théorie Susy en détectant une des particules prédites ? Kenneth Lane pense que non. L'enjeu est un repas chez Frédy Girardet, sacré « Cuisinier du siècle » par Gault et Millau, dans son restaurant près de Lausanne.

Aujourd'hui, Frédy Girardet n'officie plus (le restaurant, très réputé, existe toujours), mais le LHC a collecté plus de $1{,}5 \times 10^{25}$ données (trois fois plus que ne le prévoyaient les termes du pari) sans donner le moindre signe d'une « sparticule ». Selon Kenneth Lane, il est temps pour David Gross, qui entre-temps a obtenu le prix Nobel de physique en 2004, de payer. Aux dernières nouvelles, le gagnant s'impatienterait…

Qu'en est-il alors des aspects astrophysiques des différentes théories ?

Jean-Pierre Luminet : En l'absence de particule détectée, les astrophysiciens peuvent tester les conséquences qu'imposent les différentes théories sur la structure et l'évolution de l'Univers. Ils s'intéressent le plus souvent à la formation des grandes structures (étoiles, galaxies, amas de galaxies, superamas…), aux lentilles gravitationnelles

On distingue trois matières noires : la chaude, la tiède et la froide. Ce n'est pas une question de température, mais de vitesse

et aux anisotropies du rayonnement fossile. Ce sont des tests assez forts ! À cette aune, la matière sombre chaude est quasiment éliminée, car le scénario qu'elle prévoit (la formation des superamas qui se fragmentent en amas, puis en galaxies…) n'est pas compatible avec ce qui est observé aujourd'hui : le film est inversé.

La matière noire froide résiste quant à elle assez bien. Elle explique à peu près correctement la hiérarchie des structures, et est compatible avec ce que l'on déduit des lentilles gravitationnelles et des anisotropies du fond diffus.

Reste la matière noire tiède, les neutrinos stériles. Elle a été un peu moins étudiée que les autres, mais parmi les variantes du modèle, les plus simples reproduisent les mêmes choses que la matière froide à grande échelle. Seuls des tests à l'échelle subgalactique distingueraient les deux théories, car elles font des prédictions différentes. Les travaux sont en cours. C'est par exemple le comptage de galaxies naines autour des galaxies, ou bien l'étude des courants stellaires que l'on observe dans des galaxies en interaction.

N'y a-t-il pas d'autre option ?

Jean-Pierre Luminet : Elle consiste à ne pas se casser la tête avec des particules de matière noire. On peut alors se tourner vers les théories de la gravitation modifiée, comme l'a fait en 1983 le physicien israélien Mordehai Milgrom avec Mond (pour *Modified Newtonian dynamics*). Schématiquement, l'idée consiste à dire que sur de grandes échelles, la gravité selon Newton est atténuée.

Le problème est que Mond ne fonctionne pas de la même façon selon les échelles. La théorie souffre d'un vrai problème d'universalité. Par ailleurs, de plus en plus d'observations la mettent en difficulté. On a découvert par exemple des galaxies, comme Dragonfly 44, constituées à 98% de matière noire. Mond est incapable de l'expliquer.

Autre possibilité, se tourner vers les fascinantes théories de gravité émergente. Le physicien Erik Verlinde s'est fait connaître depuis quelques années sur ce sujet, mais l'idée en revient au physicien américain Ted Jacobson. Il s'est inspiré dans les années 1990, des travaux de Jacob Bekenstein et Stephen Hawking sur l'entropie des trous noirs pour insister sur le fait qu'il y a une vraie corrélation entre la relativité générale et la thermodynamique. En quelques mots, la structure intime de l'espace-temps serait constituée de bits quantiques intriqués d'où la gravité émergerait : elle ne serait plus une interaction fondamentale. Dans des zones plus ou moins bien intriquées se crée quelque chose qui ressemble à l'énergie sombre répulsive. Et d'interactions avec la matière baryonique, surgirait une force supplémentaire, attractive cette fois, simulant très bien la matière noire non baryonique. La matière noire est devenue un artefact.

Erik Verlinde a commencé à appliquer sa théorie pour expliquer les courbes de rotation des galaxies spirales. Et il y est parvenu ! La prochaine étape consistera à utiliser la théorie pour rendre compte des anisotropies du fond diffus et des lentilles gravitationnelles. Il y a encore beaucoup de travail, mais c'est assez joli, il faut le reconnaître.

Laquelle parmi toutes ces théories aurait votre préférence ?

Jean-Pierre Luminet : Difficile de répondre. Je travaille actuellement à mon prochain livre qui récapitule les différentes approches en gravité quantique et pèse le pour et le contre de chacune. Dès que j'en aborde une nouvelle, je suis séduit. Et puis, je passe à une autre…

Passons pour finir à l'énergie sombre, le fameux Λ. Que peut-on en dire ?

Jean-Pierre Luminet : Elle a été proposée pour expliquer l'accélération de l'expansion de l'Univers, en 1998. Cependant, bien avant d'« inventer » l'énergie sombre, on avait déjà la constante cosmologique, dans la version de Georges Lemaître (*voir Indispensable constante cosmologique, par J.-P. Luminet, page 92*). Je continue à penser qu'elle fait partie intégrante de la relativité générale et explique correctement les choses. Mais comme dans le cas du modèle standard des particules, les astrophysiciens ont proposé de nombreuses théories, des extensions de la théorie des cordes, des adaptations de la théorie quantiques des champs… C'est enthousiasmant, certes, et c'est important d'avoir de l'imagination, mais la physique actuelle ne souffre-t-elle pas d'un excès d'imagination par rapport au déficit de données expérimentales ?

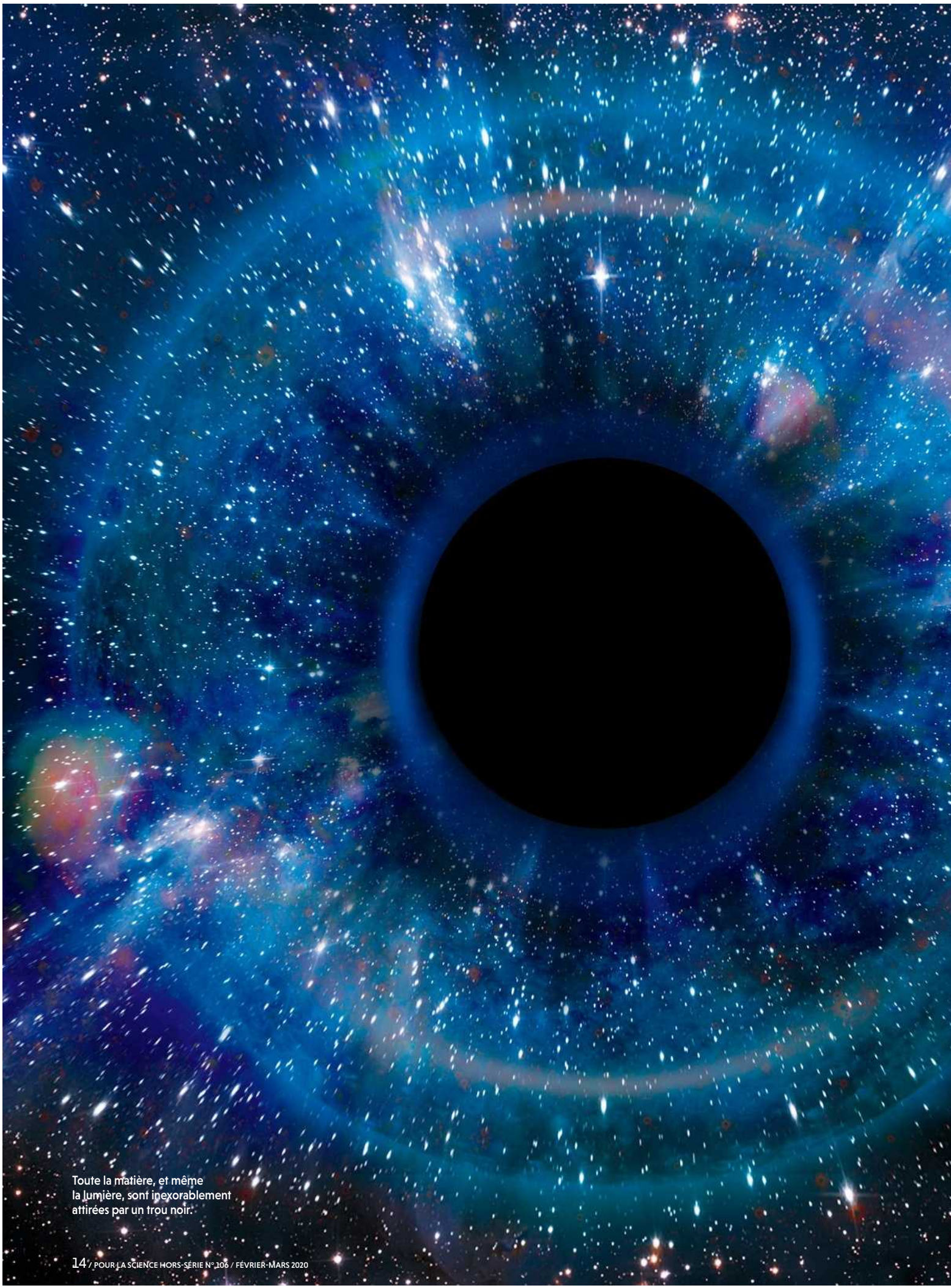
James Peebles, Prix Nobel en 2019, n'est-il pas du même avis que vous ?

Jean-Pierre Luminet : En effet. Il a été l'un des premiers à reconnaître le travail de Georges Lemaître et à ressortir du « placard de la cosmologie » la constante dont on a bien besoin pour expliquer pourquoi la densité de l'Univers est quasiment proche de la densité critique alors que la matière baryonique noire n'en compose que 5%. Dès les années 1980 et la découverte de l'inflation, il a proposé de réintroduire la constante cosmologique. Mais il n'a pas été entendu.

Dans certaines théories, la structure intime de l'espace-temps serait constituée de bits quantiques intriqués

Par ailleurs, je l'admire beaucoup. C'est vraiment, avec George Ellis, et deux ou trois autres, l'un des vrais grands cosmologistes encore vivants qui maîtrisent à la fois la théorie, les observations… à l'occasion de son Nobel, je lui ai adressé un bref courriel de félicitations. À ma grande surprise, il m'a vite répondu que les messages comme le mien, « venus du passé », étaient jusqu'ici la meilleure chose qu'il retirait de son prix…

PROPOS RECUEILLIS PAR LOÏC MANGIN.



Toute la matière, et même la lumière, sont inexorablement attirées par un trou noir.

© Shutterstock.com/Maxal Tamor

TROUS NOIRS SUPERSTARS

Les trous noirs, ces astres d'une densité folle, sont sous les feux de l'actualité ! D'abord, on a réussi à en prendre un en « photo », malgré son éloignement et sa petitesse. Ensuite, on leur doit les premières ondes gravitationnelles détectées. Cette validation de la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein inaugure une façon inédite de scruter et d'étudier l'Univers, indépendante des photons. D'où le rêve enfin accessible de remonter aux tout premiers instants de l'Univers. S'ils ouvrent un nouvel horizon aux cosmologistes, les trous noirs ont-ils en eux-mêmes un avenir ? Ne sont-ils pas le stade ultime de l'évolution d'une étoile par exemple ? Pas sûr. Selon la théorie de la gravité à boucles, ils se transformeraient en… trous blancs. Troublant.

L'ESSENTIEL

- D'un trou noir, on ne peut prendre en photographie que la silhouette se découpant sur un fond lumineux.
- Pour y parvenir, on doit relever plusieurs défis, car un trou noir est très petit et très éloigné.
- L'interférométrie, c'est-à-dire la mise en réseau de télescopes, aide à les relever.
- Ainsi, l'EHT, un télescope virtuel de la taille de la Terre, a obtenu l'image du trou noir M87* en 2019.

L'AUTEUR

ALAIN RIAZUELO
est chargé de recherche CNRS à l'institut d'astrophysique de Paris.

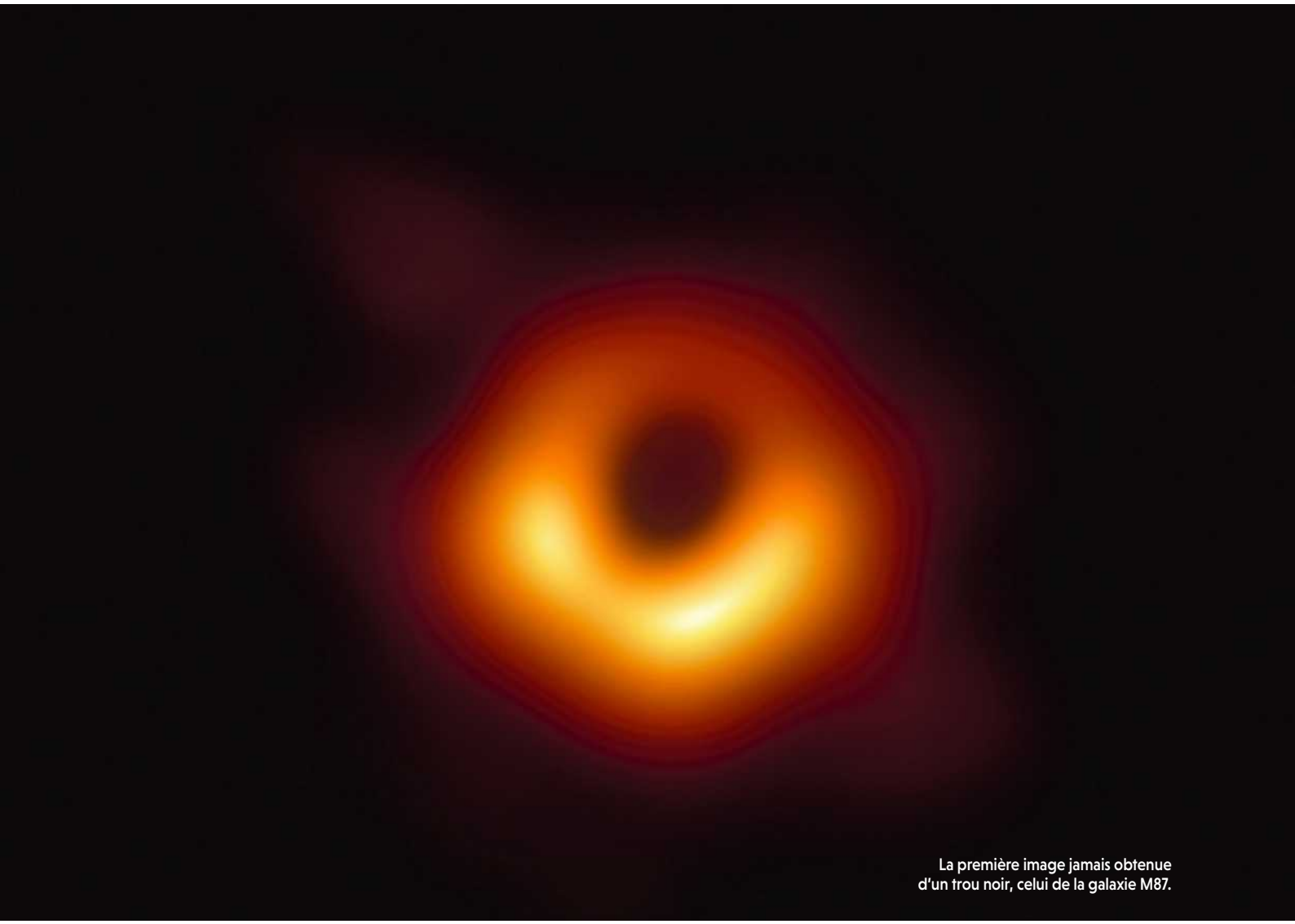
L'épopée d'une image historique

Prendre en photo un trou noir. Ce fut longtemps le but ultime des astronomes, un but finalement atteint en 2019 au prix de nombreux efforts. Retour sur une quête longue d'un quart de siècle.

Parmi vos nombreuses photos de vacances, vous avez nécessairement le cliché d'un ciel nocturne avec la Lune, des étoiles, voire la Voie Lactée pour les plus chanceux. Regardez-les attentivement, scrutez-les et essayez de repérer… un trou noir. Impossible, car d'ordinaire, prendre une image d'un astre, c'est arriver à distinguer sa lumière, parfois très faible, sur le noir du ciel. Or avec un trou noir, c'est le contraire. Il n'émet pas de lumière, et la seule chose qu'on puisse faire pour le photographier, c'est de voir sa silhouette se découper sur un fond lumineux.

Or ce dernier est fourni par le trou noir lui-même, ou plutôt son environnement immédiat : quand l'astre avale la matière qui l'entoure, celle-ci s'organise sous la forme d'un disque dit « d'accrétion ». Plus la matière du disque est proche du trou noir, plus elle tourne vite autour de celui-ci. Deux anneaux de matière adjacents se frottent ainsi l'un à l'autre en raison de leur vitesse de rotation différente, ce qui échauffe la matière au point de la rendre très lumineuse. C'est elle qui fournit le rayonnement qui permettra de distinguer le trou

© EHT Collaboration



La première image jamais obtenue d'un trou noir, celui de la galaxie M87.

noir. Fin de l'histoire ? Non, car les trous noirs sont des objets petits, très petits. C'est là que résidait le défi relevé par les astronomes de l'*Event Horizon Telescope* (*EHT*) en avril 2019.

Quand il ne tourne pas sur lui-même, le rayon d'un trou noir se calcule simplement : trois kilomètres par masse solaire. Un trou noir stellaire typique de dix masses solaires a donc un rayon de 30 kilomètres, ce qui est très petit. Depuis la Terre, aucune image détaillée de la surface d'un astéroïde de cette taille, même situé à « seulement » quelques centaines de millions de kilomètres, n'est possible avec des télescopes au sol. Et les trous noirs sont immensément plus éloignés. Sur les probables dizaines de millions de trous noirs de notre Galaxie, les quelques dizaines connus sont tous à plusieurs milliers d'années-lumière, soit plusieurs millions de milliards de kilomètres.

UNE MOLÉCULE D'EAU À 30 KILOMÈTRES

Quelques chiffres illustrent la difficulté. Le plus souvent, la taille angulaire d'un objet de rayon R situé à une distance d est donnée par la formule $2\,R\,/\,d$, le résultat étant donné en radians. Pour un trou noir, la formule est légèrement plus favorable. Puisqu'un trou noir dévie la lumière, l'effet de focalisation lui confère (ou plutôt confère à sa silhouette) une taille environ 2,5 fois plus grande. Prenons l'exemple de Cygnus X-1, le plus célèbre des trous noirs stellaires, et le tout >

premier identifié comme tel. D'une masse proche de dix masses solaires, il est situé à 5000 années-lumière du Soleil. Son diamètre angulaire est donc de… 3×10^{-15} radians, soit, pour parler en des unités plus pratiquées dans la communauté astronomique, 0,6 nanoseconde d'angle (rappelons qu'on subdivise un degré en 60 minutes d'angle, elles-mêmes subdivisées en 60 secondes d'angle). Précisons que l'œil humain à une résolution qui au mieux approche 1 minute d'angle, soit 100 milliards de fois trop. Aussi, quelle que soit l'analogie que l'on puisse considérer, un tel diamètre angulaire est ridiculement petit. Il correspond à un unique proton à 25 cm de distance, ou à une molécule d'eau à 30 kilomètres. Inaccessible!

Faute de voir des petits trous noirs, tournons-nous vers les gros, les trous noirs supermassifs. Ils sont beaucoup plus rares, puisqu'on n'en compte qu'un seul par galaxie au sein de laquelle il se trouve invariablement au centre. Mais même de ce côté, le choix reste limité. Il y a certes Sgr A* au cœur de notre propre Galaxie. Sa masse est connue précisément, car on peut suivre mois après mois la trajectoire des étoiles qui orbitent autour. L'une d'elles notamment, baptisée S-2, boucle une révolution autour de lui en une quinzaine d'années. Elle fait l'objet d'un suivi depuis les années 1990, et les astronomes ont pu scruter précisément son orbite, qui permet, *via* des lois établies il y a quatre siècles par Johannes Kepler, de déterminer la masse de ce trou noir à 4,1 millions de masses solaires, un chiffre hélas assez modeste pour un trou noir supermassif.

Placé à environ 26000 années-lumière, ce trou noir occupe une taille bien plus grande que Cygnus X-1, quoiqu'encore très petite: environ 50 microsecondes d'angle, soit la taille apparente d'un objet de 10 centimètres qui se trouverait… sur la Lune. Autrement dit, vous pourriez peut-être voir la silhouette de Sgr A* si vous pouviez discerner les traces de pas de Neil Armstrong depuis la Terre.

Pour se rendre compte de la difficulté de l'entreprise, il est nécessaire de faire un détour par les lois de l'optique. Quand une onde lumineuse traverse une ouverture, l'effet est le même que pour la houle contournant la jetée d'un port: l'onde se déforme. Ce phénomène de diffraction est inévitable, même pour un télescope de très grande taille.

Vous pouvez faire l'expérience de ces déformations chez vous si vous avez des rideaux en tissu fin à vos fenêtres. Une source de lumière quasi ponctuelle située à l'extérieur de la pièce produit un motif en croix à la traversée du voilage, une réminiscence du tissage carré ou rectangulaire. De telles croix apparaissent également dans les clichés astronomiques (*voir la figure page ci-contre*): dans un télescope, le miroir secondaire est en général maintenu au-dessus du miroir primaire par quatre supports métalliques qui déforment le front d'onde et favorisent la formation de ces croix caractéristiques sur les images dès que l'objet est brillant.

UN MIROIR DE DEUX KILOMÈTRES DE DIAMÈTRE

Un instrument optique a donc inévitablement une résolution finie. Plus précisément, elle est déterminée par le rapport de la longueur d'onde d'observation au diamètre du télescope. C'est là que le bât blesse. Ce rapport doit être plus petit que la taille angulaire de l'objet dans le ciel. Pour observer Sgr A* dans le domaine visible, la finesse de détail nécessaire serait seulement atteignable par un miroir unique de 2 kilomètres de diamètre. Et plus grand encore, car le centre galactique est opaque à la lumière visible. L'infrarouge proche serait pertinent, mais avec des longueurs d'onde au minimum deux ou trois fois plus grandes que celles de la lumière visible, un miroir devrait être deux à trois fois plus étendu…

Pour contourner cet écueil tout autant technique que financier, les astronomes peuvent compter sur une méthode envisagée dès le début du xx^{e} siècle par les physiciens américains Albert Michelson et Edward Morley: l'interférométrie. L'idée est de remplacer un unique appareil de (très) grand diamètre par une collection d'instruments plus petits, puis de combiner leur lumière d'une façon astucieuse, afin de créer virtuellement un instrument bien plus grand, dont la taille sera de l'ordre de celle de la zone sur laquelle est réparti le réseau de télescopes.

Voir le trou noir Sgr A* équivaut à discerner les traces de pas de Neil Armstrong sur la Lune… depuis la Terre

Sur ce cliché des Pléiades, le phénomène de diffraction *(les croix lumineuses)* est important. D'autant plus important que l'objet est brillant, il est dû aux limitations inhérentes à tout télescope. On doit en tenir compte pour photographier un trou noir.

Cependant, pour fonctionner, les télescopes doivent être combinés comme s'ils étaient des éléments d'un même miroir, c'est-à-dire comme s'ils recevaient en même temps le même front d'onde. Ce n'est pas le cas pour des instruments dispersés à la surface de la Terre. Pour exploiter leur synergie, il est nécessaire d'introduire des mécanismes de retard afin de parfaitement synchroniser les signaux reçus.

Dans le domaine optique, la solution est particulièrement complexe. Les signaux de chaque télescope sont envoyés sur un dispositif (un banc optique) contenant au moins un miroir mobile qui à chaque instant doit se positionner en un endroit donné, avec une précision comparable à celle de la longueur d'onde, soit ici moins de 1 micromètre…

UN TÉLESCOPE DE LA TAILLE DE LA TERRE

En pratique, cette technique n'est utilisable qu'avec des télescopes séparés au plus d'une ou deux centaines de mètres, soit la distance qui sépare les télescopes du *VLT* européen au Chili. Au-delà, la technique ne fonctionne plus, rendant l'interférométrie optique inopérante pour ce genre d'observation. C'est encore plus le cas dans le domaine infrarouge, puisque avec des longueurs d'onde plus grandes, la séparation des télescopes devrait être augmentée en proportion elle aussi afin de conserver la même résolution. C'est un peu inextricable.

Heureusement, les limitations de l'interférométrie peuvent être surmontées en observant à de bien plus grandes longueurs d'onde, pour lesquelles la combinaison des signaux reçus par les différents instruments est plus simple. Mais l'augmentation de la longueur d'onde doit s'accompagner de celle, en proportion, de la distance séparant les instruments. Le projet de l'*EHT* est né de cette idée, avec l'objectif de photographier Sgr A* avec le plus grand instrument astronomique jamais construit, puisque les instruments utilisés seraient éparpillés… sur toute la surface de la Terre, soit près de 10000 kilomètres (*voir la figure page suivante*).

Sur de telles distances, la longueur d'onde d'observation peut être 5000 fois plus grande que dans le domaine optique, c'est-à-dire 3 millimètres, soit dans le domaine des ondes radio. Le concept de l'*EHT* est d'utiliser des radiotélescopes déjà existants, et les faire travailler de concert à une longueur d'onde encore plus petite (1,3 millimètre), indispensable pour distinguer des détails du pourtour de la silhouette du trou noir.

Mais le défi restait considérable : avec des instruments situés sur différents continents, >

© Nasa/R. Gendler

pas question de faire interférer en direct les signaux reçus. L'idée consista à enregistrer le signal reçu par chaque instrument, et de les combiner numériquement une fois tous les supports physiques des enregistrements récupérés sur chaque site.

Dès lors, le défi ne relevait plus tant de l'optique que des performances du matériel informatique. À la longueur d'onde d'observation de 1,3 millimètre correspond une fréquence de 230 GHz, et c'est à un débit comparable que le signal doit être enregistré. Il y a une vingtaine d'années, quand les radioastronomes ont sérieusement envisagé un tel défi, les vitesses d'écriture des matériels informatiques alors disponibles étaient environ cent fois trop faibles, rendant l'observation impossible, mais on était en droit d'espérer que la technologie rendrait la chose possible dans dix, quinze, vingt ou trente ans, ce qui fut effectivement le cas.

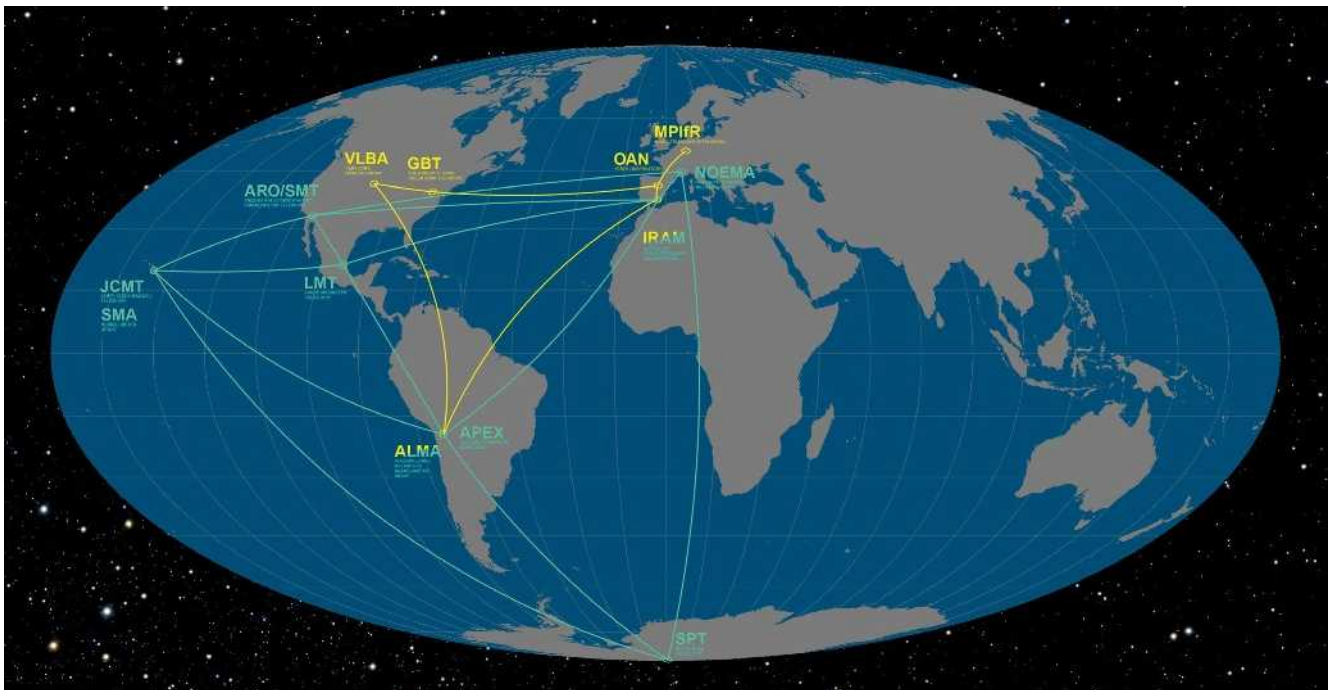
Mais pour quel résultat envisageable ? Avec seulement quelques instruments, l'imagerie est impossible. Disons pour simplifier que les observations interférométriques ne permettent d'acquérir qu'un certain nombre d'éléments d'information sur l'image, un nombre croissant avec le nombre de paires de télescopes du réseau : un s'il y a deux télescopes, trois avec trois télescopes (on peut faire trois paires avec trois éléments pris deux à deux), six avec quatre et ainsi de suite. Pour des étoiles dont on connaît la forme (sphérique, éventuellement aplatie par leur rotation), on peut déterminer le diamètre et éventuellement l'aplatissement, mais guère plus.

Des informations supplémentaires peuvent aussi être obtenues en utilisant la rotation de la Terre : du fait que les instruments, fixes, pointent vers une source dont la position dans le ciel varie revient à imaginer que ce sont des télescopes dont la position varie vus depuis la source. À un instant donné, le nombre d'éléments d'information recueillis est le même, mais ils diffèrent d'un instant à l'autre, permettant de faire de l'imagerie.

LE PÔLE SUD EN RENFORT

Pour autant, l'image que l'on peut espérer fabriquer par cette technique restera bruitée, et ce d'autant plus que le nombre d'instruments utilisés est faible. C'est pourquoi les réseaux interférométriques ont toujours besoin du plus grand nombre d'instruments possibles : 27 pour le *Very Large Array* américain, et 66 pour le réseau *Alma*, au Chili. L'*EHT* est à un niveau plus modeste, utilisant moins d'une dizaine de sites : en Europe, l'antenne de l'Institut de radioastronomie millimétrique au Pico Veleta, dans le sud de l'Espagne, en Amérique du Sud, notamment le grand observatoire radio *Alma*, au Mexique le *Large Millimiter Telescope*, et plusieurs antennes étatsuniennes, sans oublier le *James Clerk Maxwell Telescope* sur les îles Hawaii.

Il manquait à ce réseau une meilleure couverture dans l'hémisphère Sud, c'est pourquoi fut décidé d'y adjoindre celle du *South Pole Telescope*, situé au pôle Sud. Lors de la campagne d'observations de 2017, huit sites furent impliqués, avec une difficulté organisationnelle (il fallait pouvoir bénéficier des mêmes nuits



Les télescopes des projets d'interférométrie *Global mm-VLBI Array (en jaune)* et *Event Horizon Telescope (en bleu)* sont répartis sur toute la planète.

© ESO/O. Furtak

d'observation sur chaque site, fortement sollicités par ailleurs), et, surtout, météorologique puisque étaient indispensables des conditions clémentes en la matière simultanément sur chaque site. Certes chaque installation astronomique avait été choisie entre autres pour sa situation avantageuse, mais bénéficier d'une fenêtre météo favorable partout en même temps résulte d'une coïncidence plutôt heureuse… qui du reste ne fut pas complètement répétée lors de la campagne d'observation de l'année suivante.

Au final, les chiffres relatifs à la prise de données donnent un peu le vertige : chaque nuit, pendant plusieurs heures, chaque site enregistra des données à raison de plusieurs gigaoctets par seconde, chaque bit enregistré devant, pour pouvoir être traité ultérieurement, être accompagné de l'heure précise d'enregistrement calée sur des horloges atomiques. En tout, 4 pétaoctets de données (soit 4 millions de gigaoctets) furent précieusement sauvegardées, puis rapatriées au même endroit. La campagne d'observation de 2017 s'intéressa à deux cibles : Sgr A*, dans notre Galaxie et le trou noir géant de la galaxie M87, une des plus grosses galaxies de l'univers local. Situé à 50 millions d'années-lumière du Soleil, soit 2000 fois plus loin que Sgr A*, il est aussi 1500 fois plus massif, donc 1500 fois plus gros.

De ces deux trous noirs, seul celui de M87 donna des résultats exploitables, car ceux de Sgr A* étaient brouillés par la variabilité de l'aspect du disque, fruit de celle du flux de matière sur le trou noir. Ces écarts dépendent de la masse du trou noir. Étant 1 500 fois moins massif, Sgr A* est une source qui peut varier sur des échelles de temps de quelques minutes, contre plusieurs jours au pire pour le trou noir de M87 (désormais baptisé M87*).

UN AN DE TRAITEMENT

Au bout de près d'un an de traitement, les données rendirent leur verdict : la silhouette du trou noir se découpe effectivement sur le fond lumineux du disque d'accrétion, légèrement plus brillant d'un côté que de l'autre, comme on s'y attendait, puisque la lumière émise par la partie du disque qui s'approche de nous sera plus intense que celle du côté opposé. En fait, la mesure de ce contraste renseigne sur l'inclinaison sous laquelle est vu ce disque, à savoir une vingtaine de degrés.

Alors bien sûr, puisqu'on se trouve à la limite de résolution des instruments, l'image peut paraître un peu floue pour qui a en tête les images du télescope spatial *Hubble*, mais c'est aussi ce qui fait sa beauté. Elle est belle non pas malgré le fait qu'elle soit floue, mais précisément parce qu'elle est floue, signe des efforts extraordinaires qui ont été consentis pour atteindre un objectif jugé inaccessible il y a seulement quelques décennies.

L'exploit désormais accompli, que peut-on espérer de plus dans le futur ? Tout d'abord étoffer le réseau d'observation, en ajoutant d'autres antennes comme celles du plateau de Bure, en France, et une autre au Groenland, afin d'obtenir une image moins bruitée. Des observations à des longueurs d'onde encore plus basse, en l'occurrence 0,8 millimètre, sont aussi possibles, mais sans garantie de succès, car l'atmosphère terrestre est de moins en moins transparente à mesure que l'on s'enfonce dans le domaine submillimétrique.

Les futures campagnes d'observation de M87* devraient permettre de passer de la première image… au premier film

DE L'IMAGE AU FILM

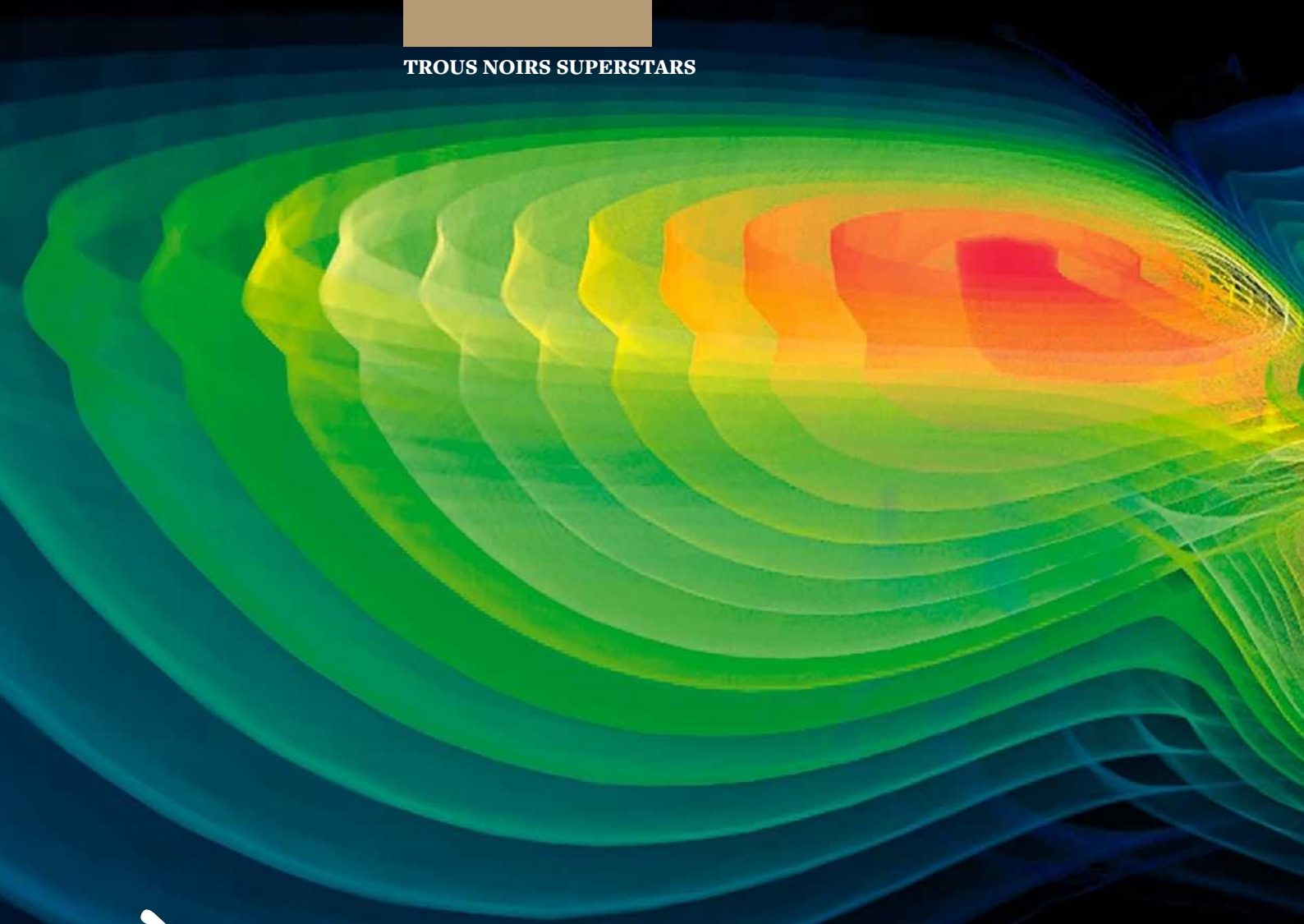
Une autre piste concerne la dimension temporelle. Pour l'heure, la physique des disques d'accrétion n'est qu'imparfaitement connue, et si la variabilité du disque est un fait établi, nous l'avons vu, on ne sait pas encore à quelle échelle de temps elle se produit. Les campagnes d'observation futures de M87* devraient permettre d'en savoir plus et de passer de la première image… au premier film.

Enfin, sur le très long terme, on peut imaginer agrandir encore la taille du réseau, en envoyant des radiotélescopes en orbite. C'est dans ce contexte que s'ébauche l'*Event Horizon Imager*, version spatiale de l'*EHT*. Avec seulement trois radiotélescopes orbitant autour de la Terre à des distances différentes, les instruments bougeront naturellement les uns par rapport aux autres par le jeu de la mécanique céleste. Et l'on espère une résolution de quelques microsecondes d'arc à peine, un chiffre qui fait rêver… à condition de résoudre un nombre considérable de nouveaux problèmes, à commencer par le volume de données à rapatrier depuis l'espace. Impossible ? L'histoire des trous noirs a déjà montré que l'impossible d'un jour ne le reste pas toujours. ■

BIBLIOGRAPHIE

THE EHT COLLABORATION *ET AL.*, First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole, *ApJL*, vol. 875, p. 1. 2019.

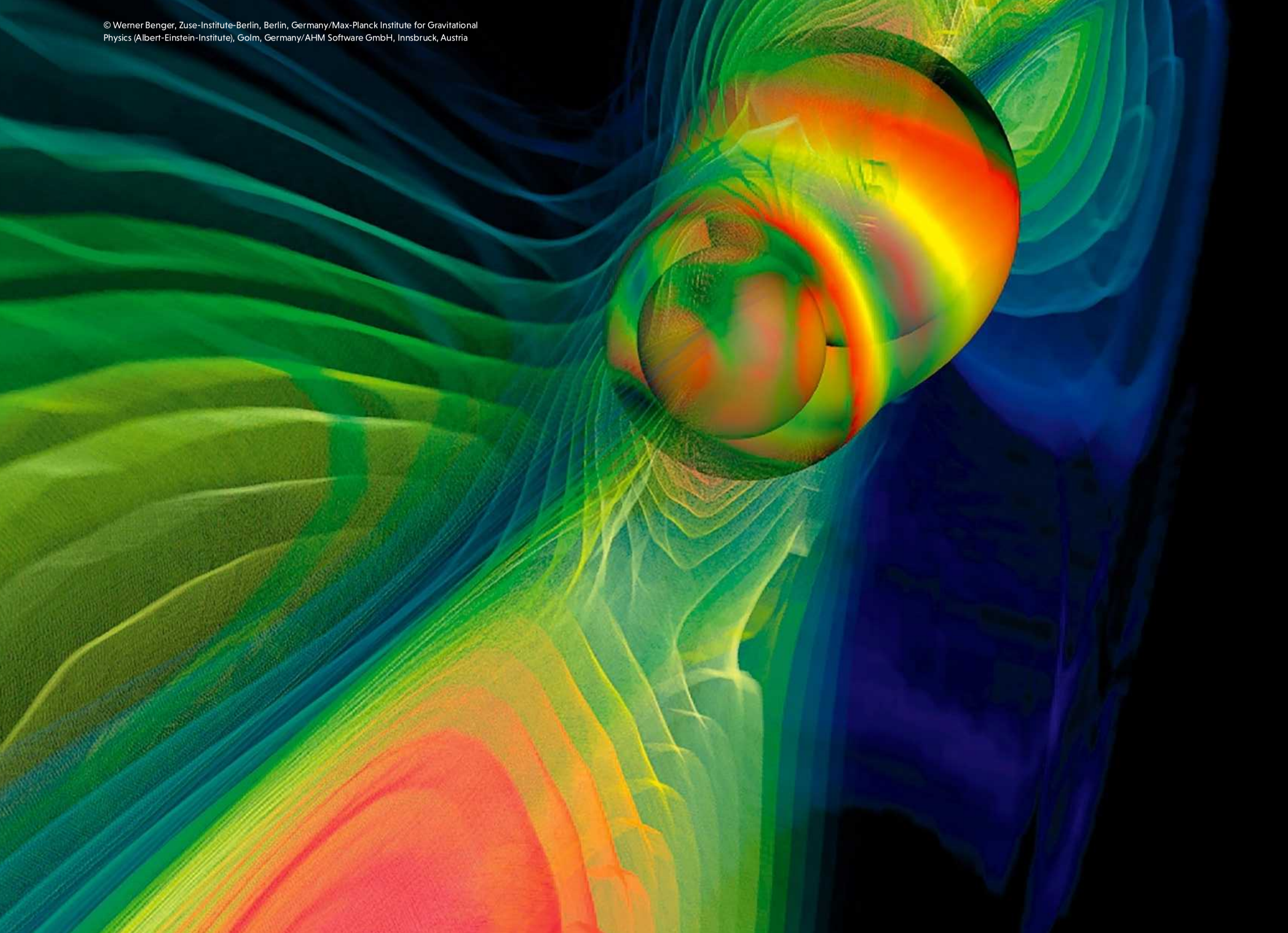
A. BRODERICK ET A. LOEB, Portrait d'un trou noir, *Pour la Science*, n° 389, mars 2010.



À l'écoute des ondes gravitationnelles

Les ondes gravitationnelles prévues par la théorie d'Einstein ont été détectées directement pour la première fois fin 2015, à l'aide de grands interféromètres de plusieurs kilomètres de long. Ces instruments tendent à nouveau l'oreille pour détecter la moindre vibration de l'espace-temps.

Les systèmes binaires comprenant deux objets compacts tels des étoiles à neutrons ou des trous noirs sont des sources intenses d'ondes gravitationnelles, en particulier au moment de la coalescence – la fusion des deux corps –, comme cela est représenté sur cette simulation numérique.


© Werner Benger, Zuse-Institute-Berlin, Berlin, Germany/Max-Planck Institute for Gravitational Physics (Albert-Einstein-Institute), Golm, Germany/AHM Software GmbH, Innsbruck, Austria

L'ESSENTIEL

- **En 1916, Albert Einstein a montré que l'espace-temps peut vibrer et, ainsi, être parcouru par des ondes gravitationnelles.**
- **Ce phénomène n'a été que lentement accepté par les physiciens, en raison de difficultés conceptuelles.**
- **Dans un premier temps, des observations ont prouvé, de façon indirecte, que ces ondes existaient.**
- **Par la suite, des ondes émises par des paires d'objets astrophysiques compacts (étoiles à neutrons ou trous noirs) ont été détectées grâce à des interféromètres géants.**

LES AUTEURS

DAMIR BUSKULIC
est professeur à l'université Savoie-Mont-Blanc et au Laboratoire d'Annecy de physique des particules, et membre de la collaboration *Virgo*.

LOÏC VILLAIN
est maître de conférences à l'université de Tours, chercheur en physique théorique à l'institut Denis-Poisson.

Le son émis par un instrument de musique est riche en informations. En l'écoutant, on peut déduire la nature de l'instrument (à vent ou à cordes), sa composition (cuivre ou bois)… Toutes ces informations nous parviennent sous la forme d'une onde acoustique, une perturbation de l'air qui se propage de proche en proche et à vitesse finie. Les physiciens s'inspirent de cette idée pour sonder l'Univers. Le milieu qui transporte les ondes n'est alors plus l'air mais l'espace-temps, et les ondes ne sont plus acoustiques, mais gravitationnelles.

En effet, l'une des hypothèses fondatrices de la relativité générale est que l'espace-temps fait preuve d'élasticité. Même vide de matière, il est le siège de vibrations, les ondes gravitationnelles. Ces dernières sont elles aussi riches en informations : d'une part, sur les événements qui les ont produites et, d'autre part, sur les propriétés de l'espace-temps dans lequel elles se propagent. En septembre 2015, leur détection directe a démontré l'existence de ces ondes qui se propagent depuis les confins de l'Univers. L'aboutissement d'une longue épopée.

Albert Einstein émet l'hypothèse des ondes gravitationnelles en 1916. Cette idée rencontre d'abord un certain scepticisme chez les physiciens. Néanmoins, avant même leur détection directe en 2015, la réalité des ondes gravitationnelles ne faisait plus de doute. Elles sont une prédiction de la relativité générale, une théorie confortée par de nombreuses observations et expériences. En outre, plusieurs observations astrophysiques fournissaient des preuves indirectes de leur existence et avaient permis de contraindre certaines de leurs caractéristiques, comme leur vitesse de propagation, celle de la lumière dans le vide.

UNE IDÉE ANCIENNE

L'idée que l'effet de la gravitation se transmet à une vitesse finie n'a pas toujours été une évidence. Elle a été avancée pour la première fois dès 1773 par Pierre-Simon de Laplace, en contradiction avec les principes de la théorie dominante de l'époque, la gravitation de Newton. Il a fallu ensuite attendre plus d'un siècle pour disposer d'une théorie relativiste et cohérente de la gravitation, en accord avec les données observationnelles.

On la doit à Albert Einstein. Il a publié en 1915 les équations de la relativité générale qui étend à tous les observateurs le principe de relativité (selon lequel les lois de la physique ne dépendent pas de l'observateur), tout en offrant une description des phénomènes gravitationnels compatible avec ce principe. L'ingrédient clé de cet exploit scientifique possible n'était rien de moins qu'un renoncement radical aux idées communes sur l'espace et le temps.

De fait, Einstein a supposé que l'espace-temps n'était pas absolu, en ce sens que sa géométrie n'était pas donnée *a priori*. Il a avancé

© Damir Buskulic

Einstein a cru un temps avoir prouvé que les ondes gravitationnelles n'existaient pas

qu'elle était au contraire déterminée par son contenu énergétique et que la gravitation était une manifestation de sa géométrie courbée, plutôt qu'une force comme les autres.

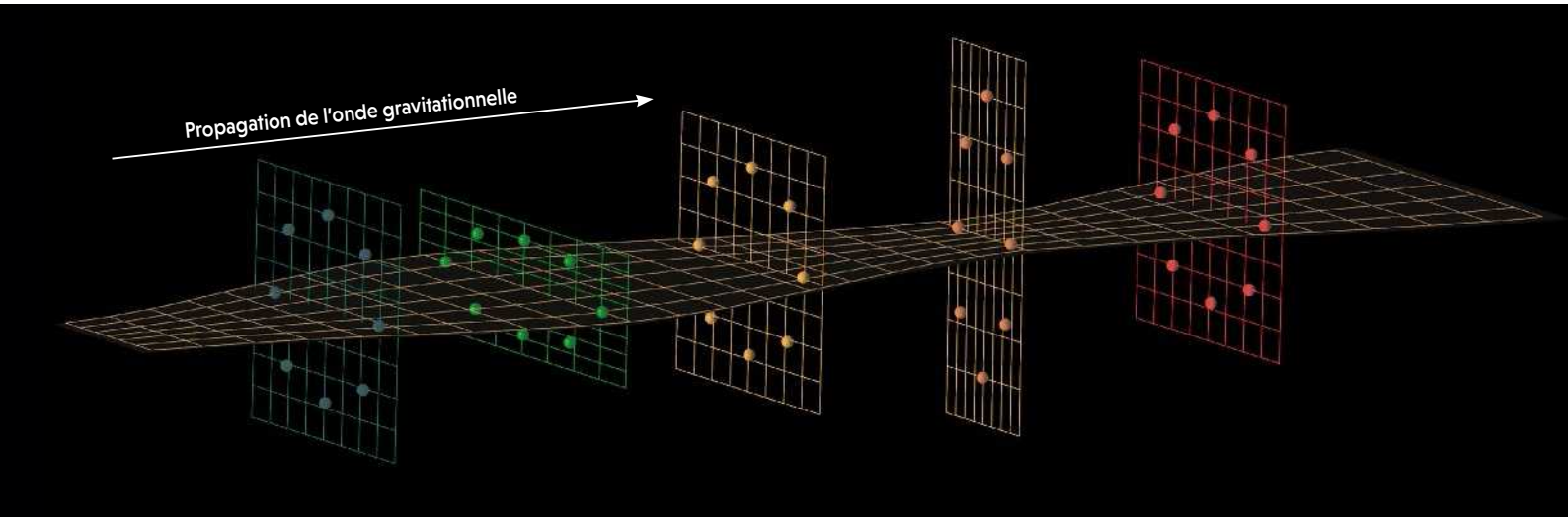
On illustre souvent ce principe par une figure où l'espace est représenté comme une surface déformée par une masse centrale, autour de laquelle un corps plus petit est en orbite. Dans cette interprétation du phénomène, aucune force n'agit sur le corps le plus léger: il obéit au principe d'inertie et va tout droit devant lui. L'espace étant courbe, sa trajectoire l'est aussi et il se retrouve à tourner autour de l'objet le plus massif. Cette schématisation, trompeuse par certains aspects, met néanmoins en avant le fait qu'en physique moderne, l'espace-temps n'est plus considéré comme une scène passive, où se déroulent les phénomènes, mais comme une sorte de continuum souple qui assure la relation entre les autres objets physiques.

En laissant de côté le temps pour simplifier, on peut en quelque sorte visualiser l'espace comme un milieu élastique pouvant se déformer, vibrer et donc être parcouru par des vagues (*voir la figure ci-dessous*). Dès 1916, Einstein a tenté de vérifier que les équations de sa théorie admettaient une solution représentant la propagation d'ondes. L'élégance mathématique de la relativité générale va cependant de pair avec la complexité de ses équations. L'une des caractéristiques de ces dernières est d'être non linéaires : la réponse d'un système n'est pas directement proportionnelle au stimulus appliqué.

SIX TYPES D'ONDES

Einstein s'intéressa donc pour commencer au cas simplifié où les ondes correspondaient à une petite perturbation de la géométrie initialement «plate» de l'espace-temps. Comme il l'espérait, ses calculs ont fait apparaître plusieurs types de vibrations du champ gravitationnel, qui se propageaient toutes à la vitesse de la lumière. Mais rapidement, le doute surgit quant à la réalité physique de ces solutions.

L'une des sources du scepticisme était liée à la nature duale des ondes gravitationnelles: elles sont géométriques, des vagues de l'espace (-temps), mais elles sont aussi physiques, puisqu'elles caractérisent le champ gravitationnel. Ainsi, on doit pouvoir leur associer certaines grandeurs telles une vitesse, un flux énergétique... Or, parmi les six types d'ondes obtenues par Einstein – six polarisations selon la terminologie moderne –, seuls deux correspondaient à un transfert d'énergie et se propageaient à la vitesse de la lumière. Ces ondes avaient aussi la caractéristique d'être transversales, comme les ondes électromagnétiques, c'est-à-dire qu'elles n'ont un effet que dans le plan >



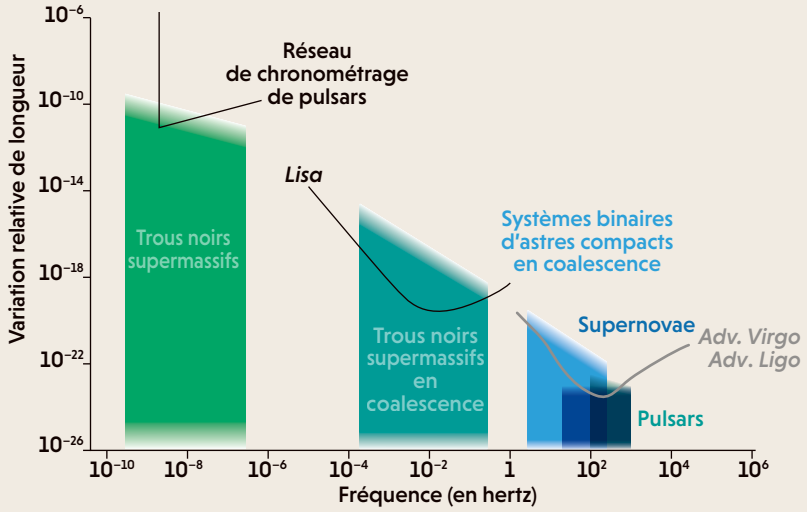
Une onde gravitationnelle déforme l'espace-temps sur son passage. Elle étire et comprime l'espace dans des directions perpendiculaires à celle de sa propagation : c'est une onde transversale. Les effets de déformation sont matérialisés ici par huit petites boules initialement disposées en cercle *(plan bleu foncé)*. L'onde qui arrive par la gauche sur le cercle le comprime *(plan vert)* suivant l'axe vertical. Puis le cercle retrouve sa forme initiale avant d'être comprimé selon l'axe horizontal.

orthogonal à leur direction de propagation (*voir la figure page précédente*). À l'inverse, les ondes sonores, longitudinales, compriment l'air dans la direction de leur propagation.

Les quatre autres polarisations obtenues ne transportaient pas d'énergie et se déplaçaient à des vitesses arbitraires. Il s'agissait en réalité d'artefacts mathématiques provenant d'un problème mal maîtrisé à l'époque, la question du choix du système de coordonnées. Notons toutefois que les physiciens travaillent aujourd'hui sur des théories alternatives de la gravitation dans certaines desquelles ces polarisations sont physiques. Leur observation serait révolutionnaire et nous permettrait de tester la physique au-delà de la relativité générale.

DES SOURCES VARIÉES

Un système n'émet d'ondes gravitationnelles que si la répartition de sa masse n'est pas trop symétrique et varie au cours du temps. Par ailleurs, l'amplitude des ondes émises est en général très faible. Elle peut devenir importante pour certains phénomènes astrophysiques *(voir la figure)* s'ils sont assez proches, tels une étoile qui explose en supernova, un pulsar ou une paire d'objets compacts (trous noirs et étoiles à neutrons) en rotation rapide proche de fusionner.
L'amplitude des ondes prévue pour ces systèmes binaires les place dans la gamme accessible par *Advanced Ligo* et *Advanced Virgo*. L'amplitude n'est cependant pas le seul critère à considérer. En effet, chaque source d'ondes gravitationnelles émet à certaines fréquences. Pour des systèmes binaires de trous noirs supermassifs (de 10^6 à 10^8 masses solaires) proches de la coalescence, cette fréquence est de l'ordre de 0,01 hertz. Cela correspond à des périodes d'environ une minute, difficiles à cerner pour des installations au sol exposées à de nombreuses sources naturelles de bruit. De telles ondes gravitationnelles sont la cible de futurs interféromètres spatiaux, tel le projet *Lisa*.
À plus basse fréquence, on trouve les émissions des systèmes binaires de trous noirs supermassifs hors coalescence, que l'on espère détecter en utilisant comme horloges de référence des pulsars dont les mesures seraient perturbées par le passage d'ondes.
À des fréquences encore plus basses, on prévoit des ondes gravitationnelles issues de l'Univers primordial. Elles auraient laissé une trace dans le rayonnement de fond diffus cosmologique sous la forme d'un mode de polarisation, mais leur amplitude n'est pas connue.



Source : GW Plotter

Les propriétés subtiles des coordonnées, combinées à la non-linéarité des équations, rendent la modélisation de la plupart des situations physiques difficile non seulement dans les calculs, mais aussi dans l'interprétation des résultats obtenus. Vers 1936, Einstein lui-même a cru un temps avoir prouvé, avec Nathan Rosen, son assistant à l'Institut des études avancées à Princeton, que les ondes gravitationnelles n'existaient pas. Une conclusion qui contredisait pourtant tous ses travaux précédents !

Dans la quête des ondes gravitationnelles, le physicien britannique Felix Pirani a franchi une étape cruciale en 1955. Il a montré qu'il était possible de détecter une onde gravitationnelle en mesurant les variations de la distance séparant au moins deux masses-test, autrement dit des corps si peu massifs que leur influence gravitationnelle est négligeable. En effet, même si elle est indétectable par une masse isolée, une onde se manifeste en contractant puis dilatant l'espace entre les deux masses-test.

Le rayonnement gravitationnel est donc détectable, mais que dire des mesures quantitatives ? Pour concevoir un détecteur, il est nécessaire de déterminer l'ordre de grandeur de la puissance émise par une source, des variations de distance envisageables lors du passage d'une onde et de la fréquence du signal. À partir des premiers travaux d'Einstein, on peut montrer qu'un être humain rayonne une puissance de l'ordre de 10^{-50} watt en secouant les bras, et que la majorité des systèmes stellaires ne font guère mieux. Ces valeurs semblaient ainsi reléguer les ondes gravitationnelles au rayon des curiosités inobservables.

QUAND L'ESPOIR RENAÎT

L'espoir a été ravivé par plusieurs découvertes inattendues : celle des quasars en 1962 et celle des pulsars en 1967. Ces objets astrophysiques sont respectivement des trous noirs ou des étoiles à neutrons en rotation. Ils sont compacts, ce qui signifie que, par rapport à leur masse, ils ont une taille si petite que la relativité générale doit être prise en compte pour décrire leurs propriétés gravitationnelles. Les physiciens ont montré que si un système compact est animé de mouvements rapides (avec une vitesse proche de celle de la lumière), cohérents et pas trop symétriques, il constitue une bonne source d'ondes gravitationnelles (*voir l'encadré ci-contre*).

Bien qu'invisible pour les télescopes, la fusion – ou coalescence – de deux trous noirs, appartenant à un système binaire, est ainsi l'un des phénomènes les plus énergétiques qui soient. La puissance gravitationnelle émise par la fusion de deux trous noirs de masse

UNE DÉTECTION HISTORIQUE

Jeudi 11 février 2016. Les équipes des collaborations *Ligo* et Virgo organisent une conférence de presse. L'euphorie règne et les sourires rayonnent. C'est qu'elles viennent d'annoncer avoir détecté des ondes gravitationnelles, le 14 septembre 2015 à 11 h 51 (heure de Paris). C'est la première détection directe de ce type.
L'événement observé par *Ligo* et noté GW150914 est un système binaire de deux trous noirs de 29 et 36 masses solaires, distant de 1,3 milliard d'années-lumière. Les deux détecteurs de *Ligo* ont enregistré le même signal avec seulement 7 millisecondes d'écart, le temps que l'onde se propage d'un détecteur à l'autre. Cette coïncidence ainsi que la forme du signal sont des indices convaincants que *Ligo* a enregistré une onde gravitationnelle.
Les ondes gravitationnelles émises par les trous noirs constituent un signal très particulier : la fréquence et l'amplitude du signal augmentent à mesure que les astres s'approchent de plus en plus vite en spirale l'un de l'autre. Les deux astres finissent par fusionner en formant un trou noir dont l'« horizon des événements », sa frontière en quelque sorte, est très déformé. Il se stabilise en une fraction de seconde et devient un trou noir en rotation sur lui-même, de forme plus régulière. C'est cette coalescence qui a produit des ondes gravitationnelles suffisamment intenses pour être détectées. L'analyse du signal enregistré indique que la masse du trou noir résultant est 62 fois celle du Soleil. Ainsi, pas moins de 3 masses solaires ont été converties ($E = mc^2$, rappelons-le) en ondes gravitationnelles en moins d'une seconde ! Et juste avant la fusion des deux astres, ces derniers tournaient l'un autour de l'autre à une cadence de 75 tours par seconde, à une vitesse voisine de la moitié de celle de la lumière…

Sean Bailly

solaire est d'environ 10^{46} watts, une valeur à comparer à la puissance lumineuse du Soleil, 10^{26} watts. Mais toutes les sources notables d'ondes gravitationnelles, aussi puissantes soient-elles, sont lointaines. En conséquence, les signaux percevables sur Terre sont extraordinairement faibles.

L'existence des ondes gravitationnelles a pour la première fois été prouvée de façon observationnelle par un biais indirect grâce à l'étude du pulsar binaire PSR B1913+16, découvert en 1974 par les Américains Joseph Taylor et Russell Hulse (ce qui leur valut le prix Nobel de physique en 1993). La diminution progressive de la période de révolution du système est liée à une perte d'énergie sous forme d'ondes gravitationnelles. Les calculs, notamment des physiciens français Thibault Damour et Nathalie Deruelle, ont confirmé l'accord entre la relativité générale et les observations.

Il restait ensuite à détecter directement les ondes gravitationnelles, un défi relevé par les expériences *Ligo*, sur deux sites éloignés aux États-Unis, et *Virgo*, au sud de Pise, en Italie, capables de mesurer des variations relatives de distance similaires à la taille d'un atome comparée au diamètre du Système solaire.

Ces détecteurs reposent sur le principe de l'interférométrie. Les masses-test sont des miroirs suspendus aux extrémités de deux bras perpendiculaires où se propage un faisceau laser de grande puissance (jusqu'à 200 watts). La moindre variation de longueur des deux bras influe sur l'intensité de la lumière au point de rencontre des deux faisceaux laser.

DE LA SUPERPOSITION DES ONDES LASER

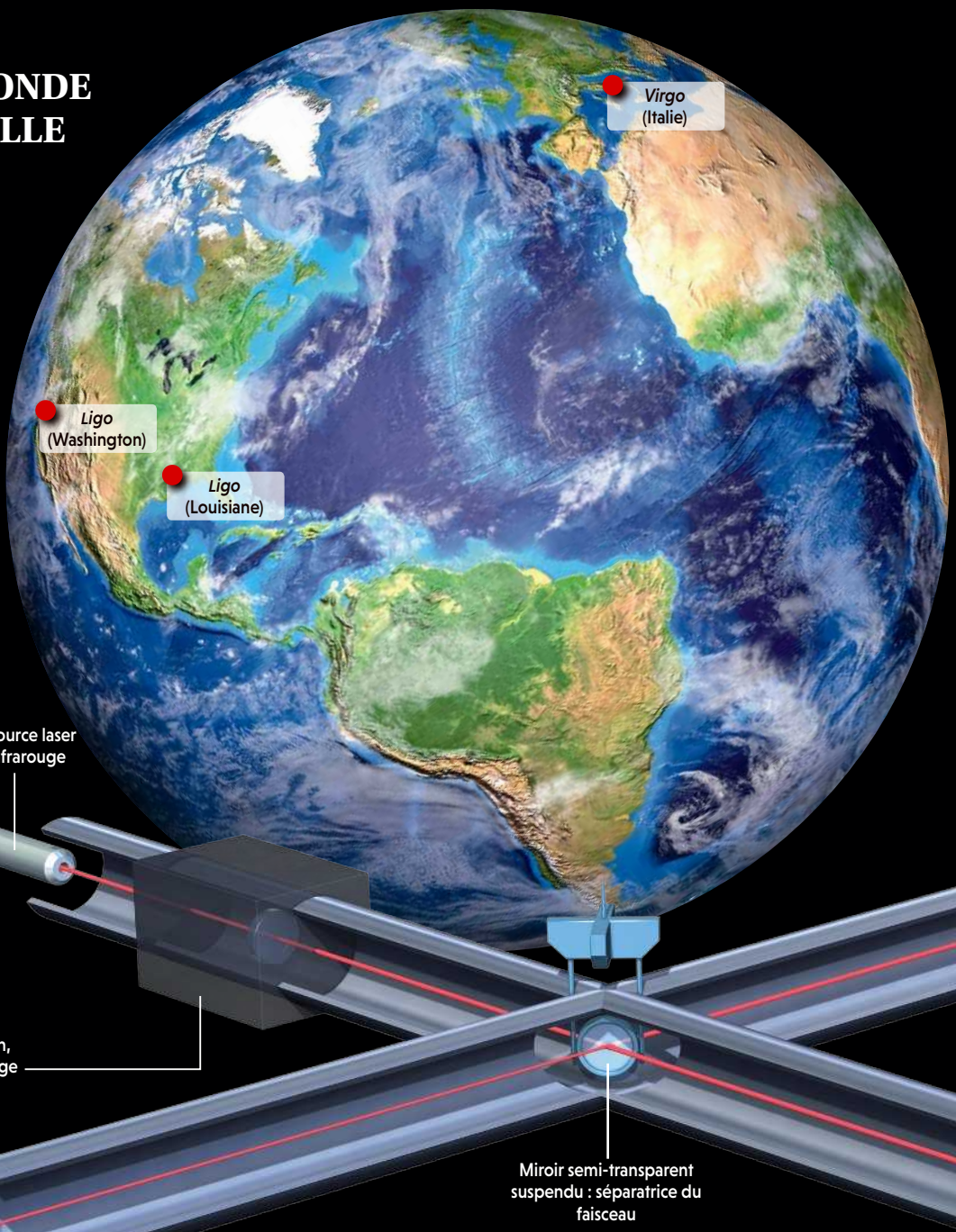
Plus les miroirs sont éloignés, plus la variation de distance induite par le passage d'une onde gravitationnelle est grande et donc « facile » à mesurer. Ainsi, pour l'expérience franco-italienne *Virgo*, les deux bras perpendiculaires mesurent trois kilomètres de long (*voir l'encadré page suivante*). Un laser infrarouge émet un faisceau qu'un miroir semi-transparent, la « séparatrice », scinde en deux. Chacun des deux faisceaux entre dans une cavité optique de trois kilomètres avant d'atteindre un miroir (la masse-test) qui le renvoie vers la séparatrice. La lumière fait un grand nombre d'allers et retours dans la cavité avant de sortir, ce qui augmente considérablement la longueur effective des bras du détecteur. Sur la séparatrice, les deux faisceaux se superposent et interfèrent, à cause du caractère ondulatoire de la lumière. Au départ, l'appareil est réglé de sorte que les deux faisceaux interfèrent de façon destructive : les crêtes de l'onde lumineuse d'un des faisceaux correspondent aux creux de l'autre, et inversement. Les deux ondes se compensent et le signal enregistré par le capteur est nul.

Lorsqu'une onde gravitationnelle passe, la longueur du trajet de chaque faisceau varie de façon infime. Cela modifie la position relative des crêtes et des creux des ondes laser. Leur superposition ne s'annule plus totalement et le capteur enregistre un signal. Les chercheurs en déduisent les variations de longueur des bras et concluent sur le passage éventuel d'une onde gravitationnelle. Avec les interféromètres actuels, les plus petites variations de longueur détectables sont de l'ordre de 10^{-20} mètre, un cent millième de la taille d'un proton ! Cependant, de nombreux phénomènes autres que les ondes gravitationnelles peuvent modifier la distance. Les physiciens doivent isoler le signal lié aux ondes gravitationnelles de ce « bruit ».

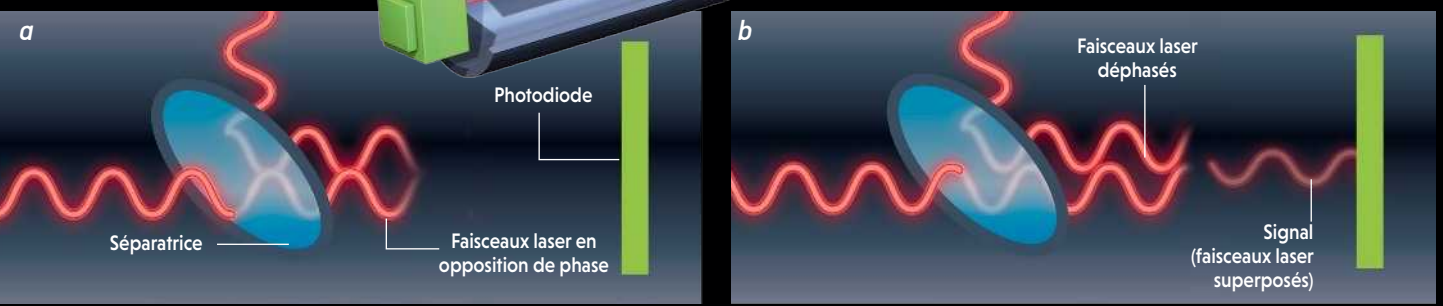
Les interféromètres fonctionnent indépendamment, mais aussi de concert. L'intérêt est de combiner leurs informations afin de >

DÉTECTER UNE ONDE GRAVITATIONNELLE

Les ondes gravitationnelles déforment l'espace sur leur passage. Elles le contractent et l'étirent alternativement. Pour détecter le passage d'une telle onde, une solution est de mesurer les variations de la distance qui sépare deux objets, des masses-test. Les variations sont infimes même lorsque les masses sont séparées de plusieurs centaines de kilomètres. Il est néanmoins techniquement possible d'atteindre la sensibilité nécessaire avec un interféromètre géant *(Virgo, ci-contre)*. En combinant en temps réel les données de plusieurs interféromètres répartis sur la Terre (*Virgo* en Italie, *Ligo* dans les États de Washington et de Louisiane), on peut estimer la position, sur la voûte céleste, de la source de l'onde gravitationnelle détectée.

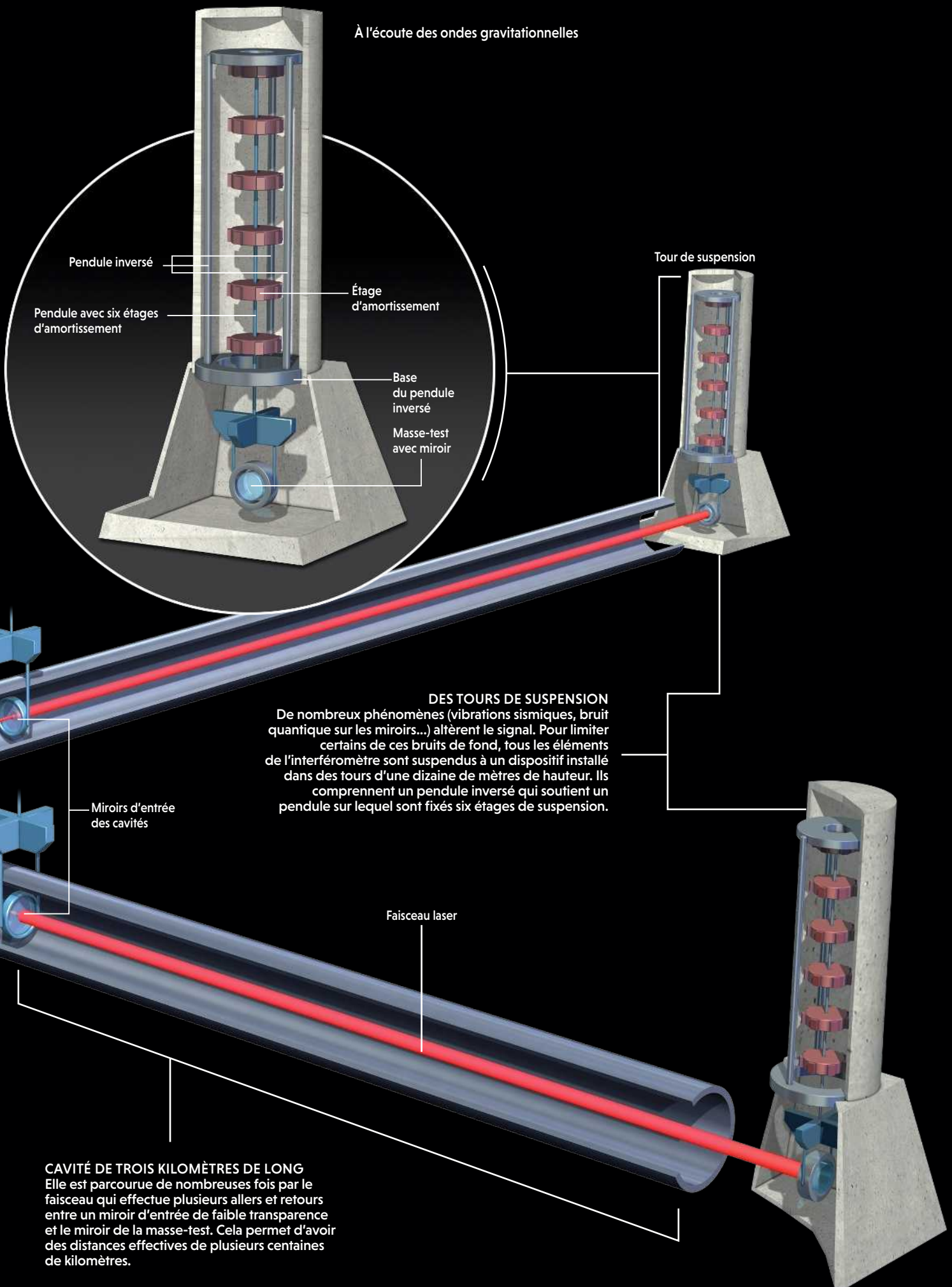


© Illustrations : Bruno Bourgeois ; Terre : NPeter/shutterstock.com ; courbes : pls



PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'INTERFÉROMÈTRE
Une source laser émet un faisceau qui est dirigé sur deux chemins perpendiculaires grâce à un miroir semi-transparent, la séparatrice. Les deux faisceaux parcourent des cavités de trois kilomètres de long, à l'extrémité desquelles se trouvent les deux masses-test. Lorsque les faisceaux ont effectué un grand nombre d'allers et retours, ils se rejoignent sur la séparatrice, où ils interfèrent. En l'absence d'onde gravitationnelle, la longueur des deux trajets est définie de telle sorte que les deux faisceaux sont en opposition de phase, ils interfèrent de façon destructive *(a)*. Si une onde traverse le détecteur, elle contracte ou étire la longueur d'un bras, l'annulation des deux faisceaux n'est alors pas parfaite et un signal est enregistré par la photodiode *(b)*.

À l'écoute des ondes gravitationnelles



DES TOURS DE SUSPENSION
De nombreux phénomènes (vibrations sismiques, bruit quantique sur les miroirs...) altèrent le signal. Pour limiter certains de ces bruits de fond, tous les éléments de l'interféromètre sont suspendus à un dispositif installé dans des tours d'une dizaine de mètres de hauteur. Ils comprennent un pendule inversé qui soutient un pendule sur lequel sont fixés six étages de suspension.

CAVITÉ DE TROIS KILOMÈTRES DE LONG
Elle est parcourue de nombreuses fois par le faisceau qui effectue plusieurs allers et retours entre un miroir d'entrée de faible transparence et le miroir de la masse-test. Cela permet d'avoir des distances effectives de plusieurs centaines de kilomètres.

UN SIGNAL D'UN NOUVEAU TYPE

Le 17 août 2017, les interféromètres *Ligo* et *Virgo* détectaient un signal qui a été l'objet de nombreuses rumeurs. Deux mois plus tard, après l'analyse des données, la confirmation est tombée : les ondes gravitationnelles du 17 août ont été émises par la fusion de deux étoiles à neutrons, un événement noté GW170817. La différence majeure avec la coalescence de deux trous noirs est que dans ce cas, l'émission des ondes gravitationnelles s'accompagne d'une contrepartie électromagnétique, avec des émissions de lumière à différentes longueurs d'onde. Et c'est exactement ce qui a été vu par près de 70 télescopes et observatoires au sol et dans l'espace.

Deux éléments suggéraient que cet événement était d'une autre nature que celle des précédentes ondes gravitationnelles observées. La forme du signal des ondes gravitationnelles pour commencer. En effet, lors de la fusion de deux trous noirs, ceux-ci tournent de plus en plus vite l'un autour de l'autre en se rapprochant jusqu'à entrer en collision, tout en faisant vibrer l'espace-temps sous la forme d'ondes gravitationnelles. Mais les interféromètres ne perçoivent que la fin de ce ballet cosmique, un « chirp » bref d'une fraction de seconde. Pour GW170817, le signal a duré près de 100 secondes.

Par ailleurs, la présence d'une contrepartie électromagnétique (un sursaut gamma détecté par l'observatoire spatial *Fermi*) plaidait pour la coalescence de deux étoiles à neutrons ou d'une étoile à neutrons et d'un trou noir. L'analyse des signaux a tranché en faveur de la première hypothèse.

L'étude de la contrepartie électromagnétique a fait l'objet de nombreuses découvertes sur ce qui se passe pendant la coalescence, à commencer par le sursaut gamma. Les astrophysiciens pensaient que la coalescence de paires d'étoiles à neutrons en produisait, ils en ont désormais la preuve ! Mais une nouvelle question se pose. L'intensité du sursaut est plus faible que ce que les modèles prévoyaient. De nouveaux scénarios sont à l'étude pour expliquer cet écart.

Un autre résultat important concerne la matière expulsée au moment de la fusion. Cette matière initialement très chaude se refroidit rapidement en émettant de la lumière dans les différentes longueurs d'onde. On parle de kilonova, un phénomène qui avait été uniquement prédit par la théorie. Selon les modèles, ce type d'événement est le siège de réactions nucléaires de synthèse d'éléments plus lourds que le fer grâce à l'abondance de neutrons dont regorgent les deux étoiles. Or, de nombreux observatoires ont scruté le rayonnement de GW170817 pendant les heures, les jours voire les semaines après la fusion. L'observatoire *Gemini* américain, le VLT européen et le télescope *Hubble* ont observé dans l'infrarouge des indices de production de plomb, d'or et de platine. On aurait ainsi observé pour la première fois ce qui est probablement l'un des principaux processus de productions d'éléments lourds.

Et ce n'est pas tout. Selon une méthode proposée en 1986 par Bernard Schutz, de l'université de Cardiff, en comparant la distance des étoiles à neutrons données par l'onde gravitationnelle au décalage vers le rouge de la contrepartie électromagnétique dû à l'expansion de l'Univers, il est possible de mesurer d'une nouvelle façon le paramètre de Hubble qui indique la vitesse d'expansion de l'Univers.

Sean Bailly

Vue d'artiste de deux étoiles à neutrons lors de la coalescence avec l'émission d'ondes gravitationnelles et sa contrepartie électromagnétique.

> déterminer, par triangulation, la position sur la voûte céleste de la source d'ondes gravitationnelles. Ce fut le cas dès la première détection en 2015. De fait, les données de *Virgo* et de *Ligo* sont distribuées et analysées en commun depuis 2007. Le principe est le même que celui de la détection de l'origine d'un son. L'écart temporel entre les perceptions de chacune de nos deux oreilles renseigne sur la provenance du signal.

PARTAGER, C'EST CONFIRMER

Le partage des données a un second avantage : une onde gravitationnelle devrait être observée dans tous les détecteurs. C'est une bonne façon de confirmer le signal.

Déterminer la position de la source d'une onde gravitationnelle en temps réel permet de transmettre l'information aux télescopes et aux satellites qui observent le ciel dans divers domaines du spectre électromagnétique afin qu'ils pointent dans cette direction et essaient d'observer des phénomènes, par exemple l'émission de rayonnement gamma, en lien avec l'onde gravitationnelle détectée. Cette stratégie fut cruciale lors de la première observation d'une fusion d'étoiles à neutrons en août 2017 (*voir l'encadré ci-dessus*).

Après une série d'améliorations, les premiers détecteurs *Ligo* et *Virgo* ont changé de nom (pour *Advanced Ligo* et *Advanced Virgo*) et vu leur sensibilité croître au point de

© NSF/LIGO/Sonoma State University/A. Simonnet

L'interféromètre *Virgo* comprend deux bras qui abritent des faisceaux laser. Lorsqu'une onde gravitationnelle traverse la Terre, elle contracte l'espace dans une direction, puis dans l'autre. La longueur des bras de *Virgo* varie alors de l'ordre d'un cent millième de la taille d'un proton.

repérer un premier événement gravitationnel dès leur mise en œuvre, en septembre 2015. Cet événement, nommé GW150914 (*voir l'encadré page 27*), était le résultat de la fusion de deux trous noirs, chacun d'environ 30 fois la masse du Soleil et situés à quelque 1 300 millions d'années-lumière. Cette détection a valu en 2017 le prix Nobel à Rainer Weiss, Barry Barish et Kip Thorne.

Après une nouvelle phase d'amélioration des détecteurs, la deuxième période de prise de données (entre décembre 2016 et août 2017) fut aussi l'occasion d'une première, la détection d'une fusion d'étoiles à neutrons. L'événement, noté GW170817, a été observé conjointement par les trois détecteurs de la collaboration *Ligo-Virgo*. Sollicité immédiatement, un ensemble de télescopes et d'instruments dans une large gamme de longueurs d'onde de la lumière a permis de repérer la galaxie hôte du phénomène et d'identifier celui-ci comme étant une kilonova, un phénomène prédit mais jamais encore observé (*voir l'encadré page ci-contre*).

LES DÉTECTIONS S'EMBALLENT

La troisième collecte de données a commencé en avril 2019. La sensibilité des détecteurs est telle qu'il y a une alerte par semaine ! Leur certification est en cours, mais on a d'ores et déjà une bonne idée de ce que l'on observe : des fusions de trous noirs, d'étoiles à neutrons ou d'un trou noir et une étoile à neutrons.

La sensibilité est mesurée par la distance maximale d'une source détectable. Cette distance dépend du type de source, de ses caractéristiques, de l'amplitude de l'onde gravitationnelle émise, de sa durée… Pour donner un exemple, une collision d'étoiles à neutrons dont chacune serait 1,4 fois plus massive que le Soleil émettrait une onde gravitationnelle à la limite de la sensibilité actuelle de *Virgo*, si elle se trouvait à environ 160 millions d'années-lumière. Un pulsar ne se ferait « entendre » qu'à seulement quelques dizaines de milliers d'années-lumière.

AUGMENTER LE VOLUME DE L'UNIVERS SONDÉ

Cette distance maximale étant connue, on doit aussi tenir compte de la rareté des sources astrophysiques, comme les collisions d'étoiles à neutrons. Une sensibilité accrue augmente la probabilité de détection. En d'autres termes, on augmente le volume de l'Univers sondé. À l'horizon 2025, la portée prévue pour les collisions d'étoiles à neutrons devrait se situer aux alentours de 1 000 millions d'années-lumière pour *Ligo* et 600 millions d'années-lumière pour *Virgo*. Parallèlement, de nouveaux détecteurs sont en construction au Japon (*Kagra*) et en Inde (*Ligo India*).

Dans un avenir plus lointain, grâce à des projets ambitieux, tels le télescope *Einstein* doté de faisceaux de 30 kilomètres de long au sol ou *Lisa* et ses bras de deux millions et demi de kilomètres dans l'espace, ce n'est plus quelques instruments de l'Univers que nous entendrons, mais tout un orchestre ! ■

BIBLIOGRAPHIE

N. DERUELLE ET J.-P. LASOTA, *Les Ondes gravitationnelles*, Odile Jacob, 2018.

P. GRANDCLÉMENT, Trous noirs et ondes gravitationnelles, *Dossier Pour la Science*, n° 75, avril-juin 2012.

B. SCHUTZ ET S. VITALE, Ondes gravitationnelles, la bande-son de l'Univers, *Pour la Science*, n° 409, novembre 2011.

D. KENNEFICK, *Traveling at the Speed of Thought : Einstein and the Quest for Gravitational Waves*, Princeton University Press, 2007.

M. BARTUSIAK, *Einstein's Unfinished Symphony : Listening to the Sounds of Space-Time*, Berkley Publishing Group, 2003.

© EGO et collaboration Virgo

L'ESSENTIEL

- Dans le cadre de la relativité générale, les trous noirs sont chauves, c'est-à-dire qu'ils ne sont définis que par leur masse et leur mouvement angulaire.
- La détection et l'étude des ondes gravitationnelles nées de la fusion de deux trous noirs permettent de tester cette hypothèse.
- Cette spectroscopie gravitationnelle est en passe de devenir un nouveau type de tests de la relativité générale.
- Tout écart à la théorie serait le signe d'une nouvelle physique.

L'AUTEUR

OLIVIER MINAZZOLI
Astrophysicien au centre scientifique de Monaco et de l'observatoire de la Côte d'Azur. Membre de la collaboration *Virgo*.

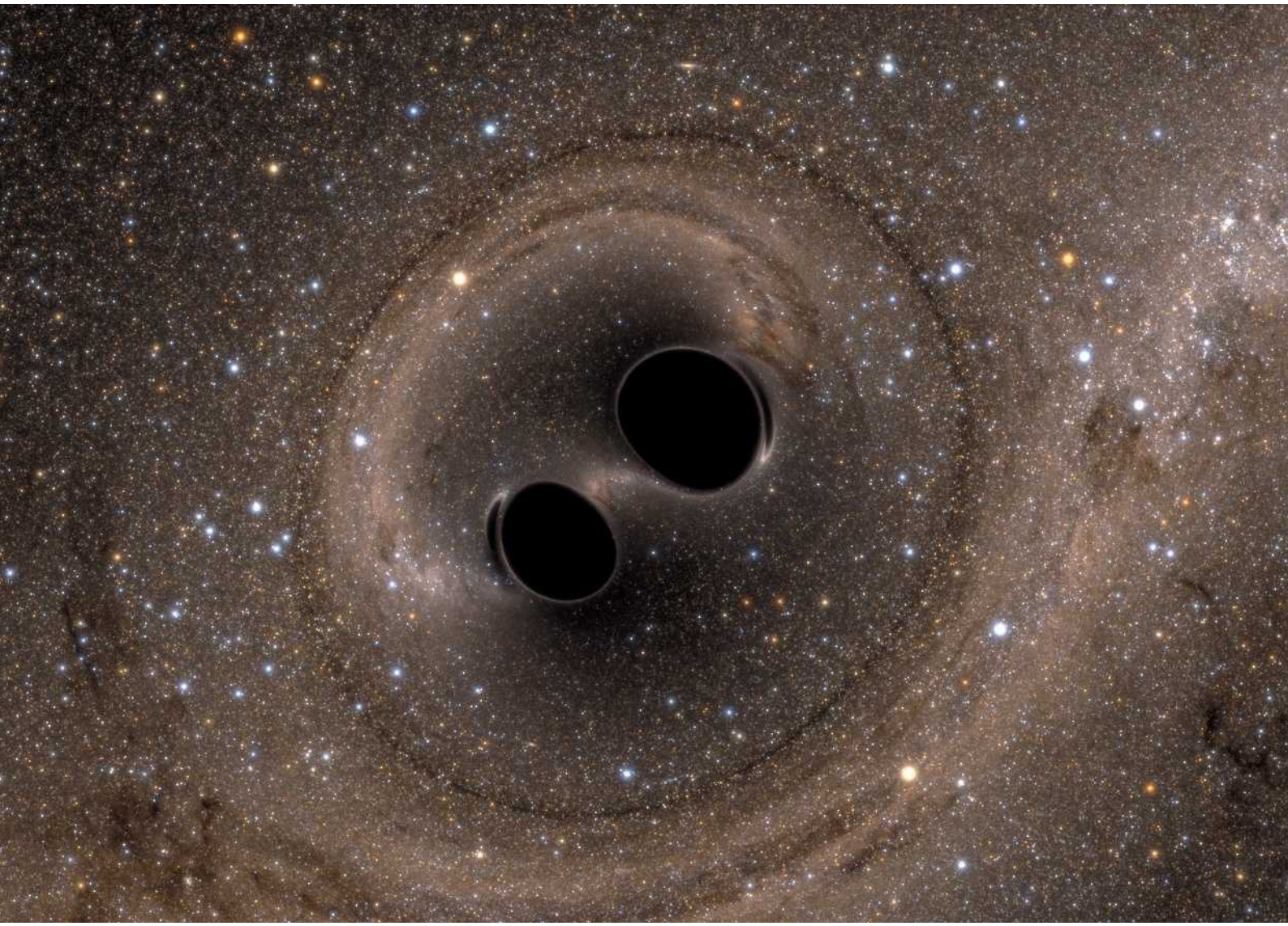
Une nouvelle fenêtre sur l'Univers

L'analyse du spectre des ondes gravitationnelles nées de la fusion de deux trous noirs est une aubaine pour étudier ces astres et, plus encore, la relativité générale dans des conditions extrêmes. Une nouvelle science ébouriffante !

© Collaboration *Ligo*

En janvier 1971, dans un article de la revue *Physics Today*, les physiciens Remo Ruffini et John Wheeler sont catégoriques : « *Black holes have no hair* », soit, en français « les trous noirs n'ont pas de cheveux ». Ce n'est à l'époque qu'une conjecture. Elle sera démontrée quelques années plus tard et prendra alors le nom de « théorème de calvitie » des trous noirs (le « *no hair theorem* » en anglais). Les trous noirs auraient donc un système pileux ? Non. Explication.

L'existence des trous noirs, objets prédits par la théorie de la relativité générale depuis des décennies, n'a été confirmée que très récemment (*voir L'épopée d'une image historique, par A. Riazuelo, page 16*). Paradoxalement, dans le cadre de cette théorie, ils seraient aussi les objets macroscopiques les plus simples de la nature, puisqu'ils seraient entièrement décrits par seulement trois paramètres : leur masse, leur moment cinétique (ou « moment angulaire », ce nombre décrivant leur rotation) et leur charge. Plus encore, la charge d'un trou noir astrophysique est très probablement



Avant de fusionner, deux trous noirs se rapprochent inexorablement en spiralant. Cette simulation montre ce que nous verrions depuis un hypothétique vaisseau spatial situé à proximité de l'événement. Les images des étoiles environnantes sont déformées par la gravité des trous noirs.

nulle, puisque l'on ne s'attend pas qu'un trou noir accrète uniquement de la matière chargée positivement (ou négativement). Deux nombres suffiraient donc à caractériser ces astres. C'est remarquable !

QUAND DEUX CHAUVES SE RENCONTRENT

Une telle simplicité ne se trouve le plus souvent que dans le monde microscopique et idéalisé des particules élémentaires, telles que les électrons, mais certainement pas dans le monde des objets macroscopiques. L'origine de la métaphore capillaire est ici : elle signifie en quelque sorte que rien à la surface des trous noirs ne complexifie leur nature fondamentalement simple. Un nouveau moyen de le vérifier, et de pousser la relativité générale dans ses retranchements, s'est récemment offert aux astronomes : l'étude des ondes gravitationnelles nées de la fusion de deux trous noirs.

Lorsque deux trous noirs fusionnent, naît un nouveau trou noir plus massif que chacun des deux trous noirs originels, mais un peu moins massif que la somme des deux masses initiales, car une partie de l'énergie est libérée sous forme d'ondes gravitationnelles en vertu de la célèbre formule $E = mc^2$. Pendant un bref instant, le trou noir nouvellement formé émet de telles ondes, avant de retrouver un état d'équilibre. Ces ondes gravitationnelles consistent en des oscillations amorties dont les fréquences particulières, c'est-à-dire le spectre, dépendent exclusivement de la masse et du moment angulaire du trou noir final, si ce dernier est bel et bien chauve comme le prédit la relativité d'Einstein *via* le théorème de calvitie. De manière générale, même hors contexte gravitationnel, ces oscillations amorties sont nommées « modes quasi normaux ». Elles sont typiques d'objets qui, soumis à une perturbation, dissipent l'énergie introduite par >

cette perturbation en retournant à l'équilibre, comme un diapason.

En conséquence, de la même manière que la spectroscopie atomique identifie des éléments par l'observation de la lumière émise à certaines fréquences spécifiques (les raies spectrales), la spectroscopie des trous noirs renseigne sur ces derniers par l'observation d'ondes gravitationnelles à des fréquences typiques. En somme, par l'étude du spectre des ondes gravitationnelles émises après la fusion de deux trous noirs, on est potentiellement capable de déduire la masse et le moment angulaire du trou noir final. Comme il est possible d'estimer par ailleurs ses paramètres à partir des propriétés observées des trous noirs initiaux, il est possible de confirmer qu'il est bien chauve. À l'inverse, l'observation d'une violation de cette propriété signifierait que la théorie sous-jacente n'est pas la relativité générale. Ce serait alors une porte ouverte vers une nouvelle physique.

Une subtilité semblait toutefois devoir contrarier ces analyses spectroscopiques. En effet, la relativité générale est une théorie non linéaire dont le comportement lors de la fusion de deux trous noirs ne peut s'approcher qu'au moyen de simulations numériques. Pour avoir des modes quasi normaux, les effets non linéaires doivent être négligeables. Mais on supposait qu'ils étaient importants dans le système durant un certain temps très bref avant et après la fusion. Le trou noir se comporterait donc bien comme une sorte de diapason et se prêterait à l'étude spectroscopique seulement au bout d'un certain temps, bref mais *a priori* inconnu, après la fusion.

Ainsi, les équipes de la collaboration *Ligo-Virgo* ont réalisé un début d'analyse spectroscopique à partir du signal (noté GW150914) des premières ondes gravitationnelles détectées en 2015, mais en en éliminant la première partie par peur des effets non linéaires potentiellement cachés et risquant de biaiser les résultats. L'idée était de maximiser les chances de validité de l'approximation en termes de modes quasi normaux. Cette méthode autorise bien une analyse conduisant à une valeur de la masse du trou noir final, mais elle reste peu précise.

L'ÉTUDE DU SPECTRE DES TROUS NOIRS POURRAIT ÊTRE UTILISÉE POUR TESTER CERTAINS ASPECTS DE LA GRAVITATION QUANTIQUE

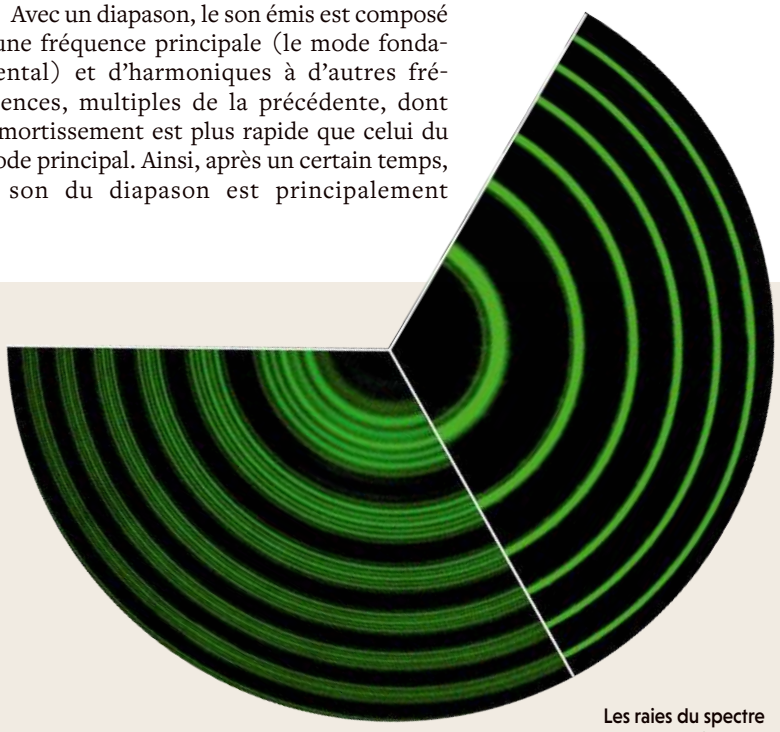
LE PROBLÈME DES EFFETS NON LINÉAIRES

Les travaux de Matthew Giesler, doctorant à l'institut de technologie de Californie (Caltech), et de ses collègues, ont changé la donne. Ils ont montré, à partir de simulations numériques, que le signal dès la fusion pouvait être décrit par des modes quasi normaux, dès lors que l'on ajoute des harmoniques au mode fondamental. En quoi consistent ces harmoniques?

Avec un diapason, le son émis est composé d'une fréquence principale (le mode fondamental) et d'harmoniques à d'autres fréquences, multiples de la précédente, dont l'amortissement est plus rapide que celui du mode principal. Ainsi, après un certain temps, le son du diapason est principalement

L'EFFET ZEEMAN

En spectroscopie atomique, lorsqu'un atome est soumis à un champ magnétique, de nouvelles raies spectrales apparaissent autour des raies d'émission déjà présentes pour un atome non soumis à un champ extérieur. Les raies spectrales de l'atome sont en quelque sorte démultipliées. Il s'agit de l'effet Zeeman, qui a valu à son découvreur l'obtention du prix Nobel en 1902. L'effet est similaire pour un trou noir chauve, et donc en rotation, par rapport à un trou noir sans rotation. Les modes fondamentaux sont démultipliés, conduisant à un nouveau spectre particulier qui dépend de l'amplitude de la rotation.

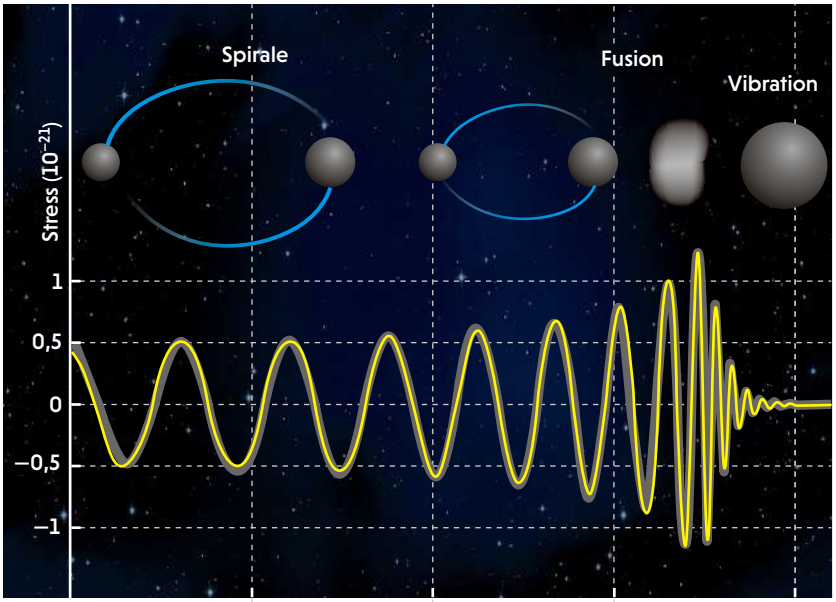


Les raies du spectre du mercure *(à droite)* sont démultipliées en présence d'un champ magnétique *(à gauche)*.

© W. Leywon

constitué de la fréquence fondamentale, les harmoniques s'étant évanouies. Transposé aux trous noirs, le comportement est similaire : alors que le mode fondamental perdure, des harmoniques peuvent avoir une contribution non négligeable au début de la phase de vibration du trou noir final, c'est-à-dire juste après la fusion. C'est bien ce qu'ont montré les chercheurs : un signal comportant un mode fondamental et des harmoniques peut tout à fait décrire le signal tel qu'il est prédit par les simulations numériques dès la fusion. En d'autres termes, soit les effets non linéaires sont négligeables, soit ils sont aussi bien décrits par des modes quasi normaux. Quoi qu'il en soit, plus besoin de se donner un laps de temps arbitraire entre la fusion et le début du signal pris en compte dans l'analyse spectroscopique.

L'équipe de Matthew Giesler a notamment simulé le signal lié à la vibration du trou noir final en y ajoutant le type de bruit qui est attendu pour un signal réel, tel qu'il serait détecté par les interféromètres *Ligo* et *Virgo*. Ils ont ensuite appliqué leur méthode pour déduire du signal la masse et le moment angulaire du trou noir final, et dont la valeur était donnée par ailleurs par leur simulation numérique. Les deux coïncidaient. Il ne restait donc plus qu'à appliquer la méthode à de vraies données.



La fusion de deux trous noirs se déroule en trois étapes : la phase spirale, durant laquelle les deux trous noirs originels orbitent l'un autour de l'autre, la phase de fusion et la phase de vibration (ou de désexcitation) du trou noir final. Les ondes gravitationnelles varient au cours de l'événement. Pour la première onde gravitationnelle, nommée GW150914, détectée par les deux interféromètres *Ligo* le 15 septembre 2014, la figure montre un signal reconstruit *(en gris)* à partir des données comparé à une simulation numérique fondée sur la relativité générale *(en jaune)*.

UN CHEVEU DANS LA SOUPE ?

C'est ce qu'ils ont fait dans une deuxième étude, cette fois coordonnée par Max Isi, de l'institut de technologie du Massachusetts (MIT). Ils ont appliqué leur méthode au signal du premier événement GW150914 et obtenu des résultats sur les valeurs de la masse et du moment angulaire du trou noir final en accord avec les premières analyses de la collaboration *Ligo-Virgo*, mais avec une incertitude réduite. Ils obtiennent surtout, et pour la première fois, des indices confirmant la présence d'harmoniques du mode fondamental dans le spectre de la phase de vibration de GW150914, ce qui est considéré par beaucoup comme un prérequis pour réellement parler de spectroscopie des trous noirs. En ce sens, leur analyse acterait la première étude spectroscopique d'un trou noir concluante.

Alors, est-il bien chauve ? Dans le cadre de la relativité générale, il est possible d'estimer les paramètres du trou noir final à partir de ceux des trous noirs originels. Or, avant la fusion, lorsque les deux trous noirs orbitent toujours l'un autour de l'autre, le signal gravitationnel détecté renseigne sur les paramètres de ces derniers. On peut alors comparer les estimations des paramètres du trou noir final obtenues à partir soit du signal avant la fusion, soit de celui produit après, lors de la vibration du trou noir final.

Si la théorie de la relativité générale est correcte, les résultats devraient être similaires. Plus précisément, puisque l'analyse de la phase de vibration du trou noir final fait l'hypothèse, par construction, que l'objet final est un trou noir « chauve », la cohérence des résultats obtenus séparément à partir des données avant et après la fusion serait une preuve que l'objet final serait, non seulement un trou noir, mais un trou noir chauve. La spectroscopie des trous noirs a donc l'avantage d'offrir aux astronomes un nouveau type de tests de la relativité générale dans des régimes jusque-là inaccessibles.

Les résultats de Max Isi et de ses collègues sur GW150914 sont encore modestes, mais vont dans le bon sens : le spectre du trou noir final est en accord avec l'hypothèse de calvitie à 20 % près. Cette valeur, encore assez peu concluante, résulte de la faible intensité du signal pendant la phase de vibration pour l'événement GW150914. Mais ce chiffre devrait s'améliorer avec de nouvelles détections. À moins que la relativité générale ne soit finalement pas la meilleure description de la nature géométrique de l'espace-temps. Par exemple, Aurélien Barrau et ses collègues ont récemment suggéré que l'étude du spectre des trous noirs pourrait, peut-être, un jour être utilisée pour tester certains aspects, pour le moment hypothétiques, de la gravitation quantique. La spectroscopie des trous noirs aidera à trancher. Tout écart à la calvitie des trous noirs serait un indice d'une nouvelle physique, un cheveu dans la soupe du modèle standard. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. ISI *ET AL.*, Testing the no-hair theorem with GW150914, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 123, art. 111102, 2019.

R. RUFFINI ET J. WHEELER, Introducing the black hole, *Physics Today*, vol. 24(1), pp. 30-41, 1971.

© Collaboration *Ligo*

© ESO/J. Colosimo

L'ESSENTIEL

- Comme les trous noirs, les trous blancs sont des solutions des équations de la relativité générale. Alors que rien ne s'échappe d'un trou noir, rien ne pénètre dans un trou blanc.
- Selon la théorie de la gravité quantique à boucles, les trous blancs seraient le destin ultime des trous noirs.
- La matière qui s'est effondrée dans un trou noir ressort de l'astre lorsque celui-ci se transforme en trou blanc.
- S'il n'y a pour l'instant aucune preuve de l'existence des trous blancs, différentes pistes sont explorées en lien avec la matière noire et les rayons cosmiques.

L'AUTEUR

CARLO ROVELLI
professeur à l'université d'Aix-Marseille, chercheur au Centre de physique théorique de Luminy

Troublants trous blancs

Les trous blancs ? Des sosies inversés des trous noirs qui expulsent la matière sans jamais en absorber et seraient le destin ultime de ces astres ultracompacts. Leur détection ouvrirait une voie inédite sur la gravitation quantique.

Le 10 avril 2019, l'humanité a admiré pour la première fois une image réelle d'un trou noir: une tache noire entourée d'un anneau brillant. Grâce à ce «cliché» (*voir L'épopée d'une image historique, par A. Riazuelo, page 16*) nous avons maintenant une preuve visible et directe de l'existence de ces objets exotiques et extrêmes.

Si l'existence des trous noirs ne fait aujourd'hui guère de doute, de nombreuses décennies ont été nécessaires pour que les physiciens en soient persuadés. Les trous noirs étaient une sorte de curiosité mathématique, une des solutions possibles des équations de la relativité générale d'Einstein, mais sans existence réelle dans l'Univers. En 1972, Steven Weinberg, de l'université du Texas à Austin, futur Prix Nobel, qualifiait encore ces objets de «très hypothétiques».

Les indices de leur réalité physique ont cependant fini par s'accumuler. Parmi les derniers, les interféromètres *Ligo* et *Virgo* ont détecté des ondes gravitationnelles, des vibrations de l'espace-temps, dont la forme correspond exactement à celle produite quand deux trous noirs tombent l'un sur l'autre en spiralant jusqu'à fusionner.

Cette histoire de la reconnaissance des trous noirs comme constituants de l'Univers pourrait bien se répéter avec d'autres objets tout aussi surprenants et exotiques que les trous noirs : les trous blancs. Comme leurs homologues sombres, ces astres correspondent à certaines solutions des équations de la relativité générale. Pour les décrire simplement, ce sont des trous noirs évoluant à l'envers: des trous noirs dont le film de la vie serait projeté en partant de la fin. Malgré cette différence, pour un observateur extérieur à un tel astre, il est difficile de distinguer un trou blanc d'un trou noir. Les deux sont massifs et dotés d'un champ gravitationnel attractif. Ils peuvent donc >